

**AValiação EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE, DUREZA
E PRESSÃO DE CONTATO NO DESEMPENHO DA VEDAÇÃO ESTÁTICA
METÁLICA DE GASES**

Cesar Augusto Fernandes de Pádoa

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Fernando Augusto de Noronha
Castro Pinto

Rio de Janeiro

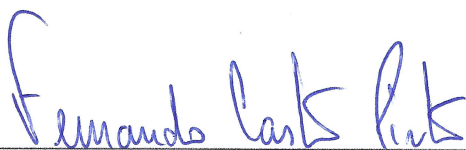
Junho de 2018

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE, DUREZA
E PRESSÃO DE CONTATO NO DESEMPENHO DA VEDAÇÃO ESTÁTICA
METÁLICA DE GASES

Cesar Augusto Fernandes de Pádoa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

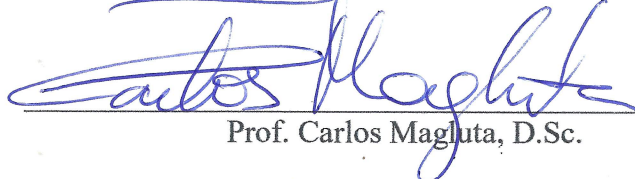
Examinada por:



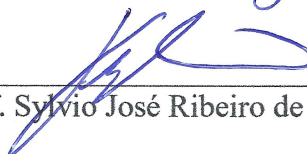
Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto, Dr. Ing



Prof. Gustavo César Rachid Bodstein, PhD



Prof. Carlos Magluta, D.Sc.



Prof. Sylvio José Ribeiro de Oliveira, Dr. Ing

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2018

Pádoa, Cesar Augusto Fernandes de

Avaliação Experimental da Influência da Rugosidade,
Dureza e Pressão de Contato no Desempenho da Vedação
Estática Metálica de Gases/ Cesar Augusto Fernandes de
Pádoa. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XI, 118 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Fernando Augusto Noronha Castro Pinto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Mecânica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 99-102.

1. Vedação. 2. Análise de Variância. 3. Fatores 4.
Vedação. I. Pinto, Fernando Augusto Noronha Castro. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa
de Engenharia Mecânica. III. Título.

*Ao meu filho, Felipe,
com todo o meu amor,
por ser a luz da minha vida e
por quem todo sacrifício vale a pena.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pois foi a quem pedi serenidade para encontrar as soluções, força para enfrentar a jornada e por ter colocado seus ajudantes no meu caminho.

Destes, começo agradecendo à minha esposa Luciana, uma estudante incansável, batalhadora, de comprometimento exemplar, sempre disposta a aprender e ampliar os horizontes do seu conhecimento. Agradeço pelo incentivo, pela companhia e pelo suporte, sobretudo quando da sobrecarga que minhas ausências a submeteram nos cuidados com nosso filho Felipe, nascido durante o meu curso.

Aos meus pais, pela fé incondicional no meu sucesso, e ao meu irmão, por ajudar de forma extraordinária com tamanha simplicidade.

À minha cunhada Carolina, pela disponibilidade, apoio e competência num dos momentos mais difíceis desta caminhada. Ao professor Eduardo Musafir, pelo apoio dado neste mesmo momento.

Aos meus orientadores acadêmicos, Sylvio e Fernando. O primeiro, por me receber, orientar e abrir as portas de um novo e fascinante mundo chamado Tribologia, permitir e viabilizar meus estudos no LabMetro, e por contribuir com sua experiência acadêmica e prática na construção do meu experimento. Ao segundo, pela amizade, desde a minha graduação, pelos aconselhamentos, mesmo antes da orientação e, finalmente, pela acolhida, quando o projeto já se encontrava em andamento, me colocando de volta nos trilhos e desatando os nós para que se transformasse num trabalho acadêmico.

Aos colegas de UFRJ, Fátima, Guilherme, Luiz e Toselli, do LabMetro, e ao colega André Beserra, amigo de graduação, pela sua valiosa ajuda. À professora Anna Carla, pela amizade, apoio e por ensinar mais do que apenas sua disciplina.

Aos colegas de Petrobras da competente equipe de válvulas submarinas, Marcos Mashiba, orientador profissional, e Jefferson Souza, por facilitarem a conciliação entre trabalho e estudo. Ao colega Renê, pelo suporte necessário na fase experimental.

Finalmente, um agradecimento especial ao amigo de mais de 20 anos, Augusto Fadel, cuja contribuição ao trabalho não se pode medir, e a todos os colegas do Laboratório Hiperbárico do CENPES: Pimentel, Ygor, Rodrigo, Luís, Edjalmo, Marcos Jr., Orlando Brito, Márcio e Antônio Kotsugai, pelo apoio irrestrito e incondicional e, sem os quais, certamente eu não teria chegado até aqui.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AValiação EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE, DUREZA
E PRESSÃO DE CONTATO NO DESEMPENHO DA VEDAÇÃO ESTÁTICA
METÁLICA DE GASES

Cesar Augusto Fernandes de Pádoa

Junho/2018

Orientador: Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto

Programa: Engenharia Mecânica

Este trabalho consistiu na realização de experimentos para avaliação de alguns fatores pré-selecionados no desempenho da vedação estática metálica de gases. Utilizando a disciplina de planejamento de experimentos, os testes foram elaborados para permitir a investigação de fatores como dureza, carga e rugosidade. O experimento consistiu em monitorar a queda de pressão através de uma interface metálica com superfícies controladas. A forma de coleta e os parâmetros selecionados são típicos da indústria, visando dar maior familiaridade dos resultados com problemas do dia a dia das instalações e equipamentos. A avaliação dos resultados fez uso de ferramentas estatísticas para validação de hipóteses. Além disso, foi feita uma investigação da participação de mais fatores descritivos das superfícies do que apenas a medida média das alturas das asperidades. Uma combinação de parâmetros descritivos mostrou potencial para incrementar os resultados de outros modelos, uma vez que apresentou relação significativa com a queda de pressão observada por meio dos testes.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EXPERIMENTAL EVALUATION OF ROUGHNESS, HARDNESS AND CONTACT
PRESSURE ON THE PERFORMANCE OF STATIC METALLIC GAS SEALING

Cesar Augusto Fernandes de Pádoa

June/2018

Advisor: Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto

Department: Mechanical Engineering

This work consisted in the accomplishment of experiments to evaluate pre-selected factors in the performance of the static metal gas seal. Using the discipline of experiment planning, tests were designed to allow the investigation of factors such as hardness, load and roughness. The experiment consisted in monitoring the pressure drop through a metal interface with controlled surfaces. The acquisition method and selected parameters are typical of the industry, aiming to give greater familiarity of the results with day to day problems of installations and equipment. Results have been assessed through statistical tools to validate hypotheses. In addition, an investigation on the role of more descriptive factors of the surfaces than only the average measure of the heights of the asperities was conducted. A combination of descriptive parameters showed potential to increase the results of other models, since it showed a significant relationship with the pressure drop observed through the tests.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação.....	3
1.2 Conteúdo da Dissertação.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Propriedades das Superfícies.....	7
2.2 Escala de Observação.....	11
2.3 Mecânica de Contato.....	14
2.4 Vazamentos.....	23
2.5 Experimentos Realizados.....	28
2.6 Modelos Para o Escoamento.....	32
2.7 Vedação de Gases por Barreira Metálica.....	34
2.8 Planejamento e Metodologia de Avaliação.....	38
3. O EXPERIMENTO.....	44
3.1 Seleção de Fatores.....	44
3.2 Materiais e Métodos.....	45
3.3 Dimensionamento do Experimento.....	52
3.4 Caracterização das Amostras.....	56
3.5 Aparato de Testes.....	60
3.6 Aquisição e Gravação dos Dados.....	61
3.7 Realização dos Ensaios.....	62
4. RESULTADOS.....	68
4.1 Avaliação da Força Aplicada.....	69
4.2 Avaliação dos Fatores Dureza e Rugosidade.....	72
4.3 Avaliação dos Parâmetros de Superfície.....	81
4.4 Regressão Linear.....	83
5. CONCLUSÕES.....	95
5.1 Próximos Trabalhos.....	97
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
Apêndice A.....	93
Apêndice B.....	94
Apêndice C.....	95
Apêndice D.....	97
Apêndice E.....	116

Lista de Símbolos

A	Fator de forma da constrição crítica
C	Condutância no escoamento molecular
$C(q)$	Função densidade espectral de potência
\hat{C}	Constante experimental
D	Diâmetro médio do selo
$E_{1,2}$	Módulo de elasticidade
E^*	Módulo de elasticidade combinado
FS	Fator de segurança
g_{00}	Movimento de corpo rígido do par
H	Dureza
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
h	Separação total
\widehat{h}_1	Separação na configuração indeformada
h_l	Rugosidade média aritmética (Ra)
K	Permeabilidade
K_e	Parâmetro experimental
L	Projeção de L_d na direção x
L_d	Comprimento real do perfil
L_y, L_x	Dimensões da região que divide o domínio em pequenos quadrados
M	Distância entre as linhas médias das superfícies
m	Constante experimental
N	Número de observações do experimento
n	Número de medições feitas de R_p
P	Pressão

P_f	Pressão no fluido
P_{ca}	Tensão de contato aparente
\bar{P}	Carga normal
p	Número de variáveis preditoras
Ph	Pressão hidráulica no pistão
P_c	Pressão na cavidade do corpo de prova
\dot{Q}	Taxa de vazamento
q	Vetor de onda associado
R	Raio externo do corpo de prova
Ra	Desvio Aritmético Médio
Rku	Curtose da distribuição de alturas
R_m	Profundidade média da superfície
R_p	Altura máxima do pico
RP_c	Número de picos por centímetro
Rq	Desvio Médio Quadrático
Rsk	Assimetria da distribuição de alturas
RS_m	Espaçamento médio entre picos
R_t	Maior distância pico-vale
R_v	Profundidade máxima do vale
R_z	Distância máxima média entre pico e vale
r	Vetor de resíduos
r_1	Raio interno da seção circular
r_2	Raio externo da seção circular
SD	Desvio padrão das alturas das asperidades
t	Espessura mínima
u	Deformação global
$u(\zeta)$	Separação entre as superfícies em função da magnificação

\bar{V}	Velocidade molecular do escoamento
X	Matriz do modelo $N \times (p+1)$
x	Posição de referência
y	Vetor de respostas $N \times 1$
α	Significância estatística
β	Vetor dos coeficientes $(p+1) \times 1$
β_a	Raio do topo da asperidades
$\hat{\beta}$	Vetor de coeficientes ajustados por mínimos quadrados
γ	Mudança de variável para indicar o número de medições de R_p
ϵ	Vetor dos erros $N \times 1$
ζ	Magnificação
η	Viscosidade
λ	Deflexão normal
ν	Viscosidade
σ	Tensão de escoamento do AISI 1045 no valor de 370 MPa
ψ	Índice de plasticidade
ω	Razão entre comprimentos

1. INTRODUÇÃO

A ação de vedação de líquidos e gases entre uniões sólidas é fundamental para as mais diversas atividades e está presente em praticamente todos os aspectos do nosso cotidiano. Em nossas residências, gases são vedados nas bebidas, nos aparelhos refrigeradores, no suprimento de gás de cozinha e no aquecimento de água, por exemplo.

O projeto destes sistemas varia de acordo com a necessidade e criticidade da aplicação. Para vedações de gases não perigosos e baixas pressões, sistemas mais simples podem ser empregados. Para vedação de gases tóxicos, inflamáveis e armazenados sob altas pressões, sistemas mais complexos são necessários.

Dentre as formas de vedação mais comuns está o contato metal contra metal, onde duas superfícies metálicas são forçadas uma contra a outra, promovendo uma barreira mecânica à passagem do fluido. Este sistema é largamente utilizado na indústria, onde diversas normas versam sobre a padronização de formas e materiais, categorização de aplicação e até mesmo sobre o projeto desta união.

Ainda assim, apesar de todo o conhecimento disponível sobre este sistema, ele ainda é objeto de extenso estudo. Novos materiais e métodos têm sido estudados visando o aumento da eficiência deste mecanismo. Por outro lado, também foram intensificados os modelos matemáticos associados à predição de desempenho e levantamento dos fatores críticos. É neste contexto que se insere este trabalho: Uma investigação experimental da relevância de alguns destes fatores sobre o desempenho da vedação metálica.

O desempenho de um par metálico sob a ação de uma carga e vedando um gás a uma determinada pressão pode ser influenciado por uma série de fatores. A geometria do contato, a intensidade da carga, a pressão do gás contido e a temperatura são alguns exemplos. Outros poderiam ser o tipo de metal empregado, o acabamento superficial, a natureza do gás, etc.

Para que ocorra a migração de gás de um lado para o outro da barreira metálica é preciso que exista um caminho contínuo que conecte estes espaços. Macroscopicamente, não é possível perceber a existência desta passagem, mas em termos microscópicos, ela

é associada à rugosidade entre as superfícies em contato. Devido às irregularidades presentes em ambas as faces do sistema, é possível que estes caminhos sejam formados. É preciso então olhar mais atentamente para a mecânica do contato entre estas rugosidades. Uma breve revisão desta disciplina desta será feita na seção 2.3.

Os sistemas de vedação estão entre as diversas aplicações que se beneficiam das pesquisas na área de tribologia. À medida em que se aprofundam os estudos em direção aos parâmetros microscópicos de superfície, aumenta significativamente a quantidade de dados necessários para validar os modelos analíticos atuais, tanto de atrito, desgaste e lubrificação, quanto de mecânica de contato e vedação.

Neste contexto, diversos trabalhos foram desenvolvidos utilizando-se de ferramentas estatísticas para melhoria dos modelos de contato e, conseqüentemente, de vazamento entre duas superfícies. Além da mecânica de contato, a dinâmica de fluidos na interface também é disciplina recorrente na tentativa de aperfeiçoar os modelos. Sob a ótica da metodologia estatística, a proposta deste trabalho é utilizar a técnica de planejamento de experimentos para a abordagem de um sistema de vedação, em particular, baseado em pares metálicos.

Se um conjunto de vedação é especificado para um processo ou equipamento, provavelmente ele é crítico para este sistema e, portanto, seu desempenho passa a ter um papel relevante no desempenho global daquilo em que está inserido. Para alguns casos, é admitida uma perda de fluido com limites estabelecidos pelo projeto. Um exemplo seriam as válvulas do tipo esfera, componente de atuação frequente utilizado na indústria do petróleo. Uma válvula absolutamente estanque à passagem de gás tornaria o produto economicamente inviável. É admitido então algum grau de vazamento, mas de forma que se possa utilizar satisfatoriamente o equipamento sem prejuízo do processo. Em outros casos, não é possível admitir qualquer vazamento. A falta de estanqueidade pode, por exemplo, levar à perda significativa de produto, representando prejuízo financeiro ou até mesmo colocar em risco a integridade de pessoas e instalações, casos típicos de anéis metálicos entre flanges numa tubulação de processo. Estes cenários nos levam, ainda, a outras perguntas: é possível conseguir estanqueidade num sistema de vedação metálico? Em caso negativo, que taxa de perda de fluido é considerada vazamento?

A predição ou a melhor aproximação da taxa de vazamento é uma ciência em

permanente evolução. Embora existam diversos padrões na indústria para garantir a estanqueidade ou, pelo menos a caracterização dos volumes vazados, o tema ainda é largamente estudado em artigos acadêmicos e profissionais. Contribuem ainda para a importância do tema inúmeros casos de falhas e acidentes causados por vazamentos em sistemas industriais com vedação metálica.

Nos modelos mais recentes, o método de avaliação numérica tem sido mais extensivamente aplicado do que os métodos experimentais. A validação, no entanto, ainda depende do sucesso na correlação com resultados práticos.

1.1 Motivação

Sistemas de vedação metálica podem ser descritos como uma interface em contato sob carga e com propriedades geométricas, topográficas e metalúrgicas tais que impedem a migração de fluido entre as zonas de diferentes pressões num dado intervalo de tempo. Cada conjunto de condições operacionais e fluido de trabalho irá determinar as propriedades mais adequadas requeridas para a aplicação.

A motivação para o presente estudo tem origem em experiências do autor na investigação de vazamentos de gás em sistemas de vedação metal contra metal. Dentre estes, existem alguns cujas causas se deram por motivo evidente, como por ocasião de riscos ou outros danos de grandes dimensões, por desvios em relação ao projeto, tais como não conformidades em matéria-prima, acabamento, tratamento térmico, dimensões e até mesmo erros de montagem.

No entanto, chamam a atenção os casos em que o sistema que apresentou vazamento atende plenamente os requisitos de projeto. Ou seja, num universo de vários sistemas semelhantes que apresentam eficiência de vedação, um ou mais apresentam deficiência mesmo estando de acordo com as especificações técnicas de projeto e fabricação.

Um exemplo é o de um sistema de discos rotativos, como o da figura 1.1. Neste sistema, uma superfície plana possui dois furos para permitir a passagem de fluido. Dois discos podem deslizar sobre esta superfície, num movimento de translação de 90 graus em relação ao centro da face, de modo a cobrir os furos e promover a vedação. Uma foto

deste sistema está mostrada na figura 1.2. No presente caso, o conjunto apresentou vazamento sistemático (com repetibilidade) em testes na pressão máxima de trabalho de 69 MPa. A investigação consistiu da desmontagem completa do equipamento seguida de inspeções visual e dimensional.

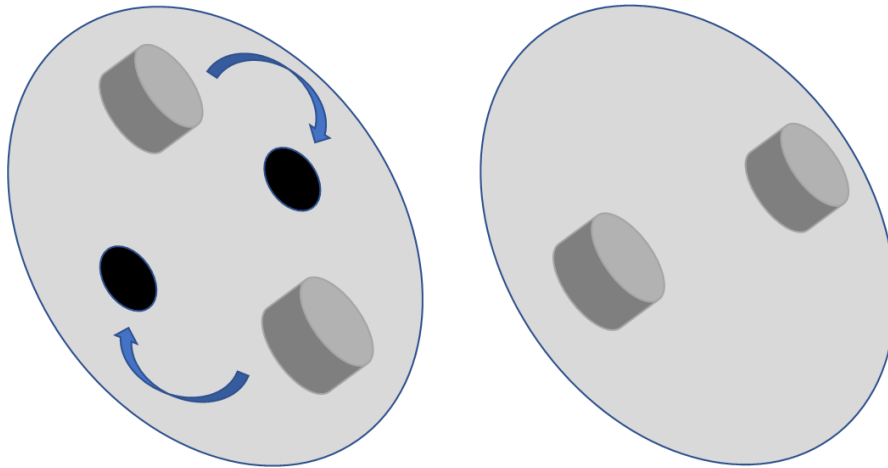


Figura 1.1: Sistema de vedação por discos rotativos. A figura da esquerda mostra as passagens abertas enquanto a figura da direita mostra os discos sobre os furos. Fonte: Autor.



Figura 1.2: Superfícies de vedação em sistema de disco rotativo. Fonte: Autor.

Nesta, são medidos os parâmetros determinados pelo fabricante como críticos para o desempenho do sistema. Foram escolhidos a rugosidade superficial, o paralelismo e a

planicidade das superfícies em contato. A primeira é verificada com rugosímetro, o paralelismo é medido em centro de medição computadorizado e a planicidade aferida com uso de luz monocromática e lente lapidada. Todos os parâmetros medidos estavam dentro das tolerâncias de projeto. Excluídos quaisquer desvios nas etapas de avaliação de material, a investigação foi encerrada sem que fosse possível chegar a uma conclusão.

Fica, portanto, a dúvida se todos os aspectos relevantes foram de fato avaliados. Buscando responder este questionamento, este trabalho aponta na direção da melhor caracterização da superfície. Como citado anteriormente, o único parâmetro topográfico medido foi a rugosidade média. Sabe-se, no entanto, que há diversos outros parâmetros mensuráveis que podem descrever a geometria das superfícies.

Este trabalho tem por objetivo avaliar a influência da dureza, rugosidade superficial e da pressão de contato sobre a taxa temporal média de queda de pressão para um sistema de vedação estático metálico de gases, incluindo parâmetros não usuais de caracterização de superfícies. A forma construtiva aproxima-se com o que é hoje encontrado nas indústrias, incluindo o método de detecção de vazamento. A proposta aqui feita consiste no uso de uma técnica estruturada de planejamento de experimentos para fornecer uma análise satisfatória dos fatores de interesse e gerar avaliações quantitativas de fácil interpretação e alta associação com os resultados laboratoriais.

1.2 Conteúdo da Dissertação

O Capítulo 1 introduz o tema do trabalho por meio de exemplos do cotidiano, apresenta a motivação e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica dos conteúdos relacionados ao problema apresentado na motivação do trabalho. São revisados os conceitos básicos para a compreensão do trabalho com caracterização de superfícies e aspectos relacionados com a ordem de grandeza destas entidades. Além disso, são revistos trabalhos nas áreas de mecânica do contato, vazamentos e os experimentos conduzidos e modelos de escoamento utilizados. Por fim, são abordados sistemas de vedação metálica comuns na indústria e a metodologia de planejamento do experimento e avaliação dos resultados.

O Capítulo 3 detalha a elaboração e a preparação do experimento, desde a fase conceitual até a seleção de materiais, instrumentos e ferramentas utilizadas. Também

apresenta as codificações utilizadas no controle dos testes e detalhes do sistema em operação.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos por meio do sistema de gravação de dados. São exibidos os gráficos que mostram a dispersão dos resultados em função de diversas variáveis. Análises sobre estes comportamentos e sobre a relação entre grandezas são feitas e testadas com o uso de ferramentas estatísticas.

O Capítulo 5 discute as características dos modelos estudados e a maneira como o resultado obtido se insere numa revisão dos conceitos destes modelos.

O Capítulo 6 revisa as principais conclusões do trabalho e sinaliza as oportunidades de novos estudos derivados das conclusões apresentadas anteriormente.

O Capítulo 7 fornece as principais referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Propriedades das Superfícies

As superfícies de engenharia são, em geral, bastante complexas para se caracterizar. Além das dimensões macroscópicas, já considerando as tolerâncias geométricas, as dimensões microscópicas são elementos importantes em diversas aplicações. A rugosidade é uma destas características.

Diversos fatores podem influenciar a rugosidade: microestrutura e tensões residuais do material, método de geração (tipo de fabricação), qualidade do processo, influência do operador, dentre outros [1]. De modo geral, os resultados são um conjunto de características geométricas distintas, das quais separam-se os efeitos dos desvios macroscópicos, permanecendo então o que efetivamente é chamado de rugosidade.

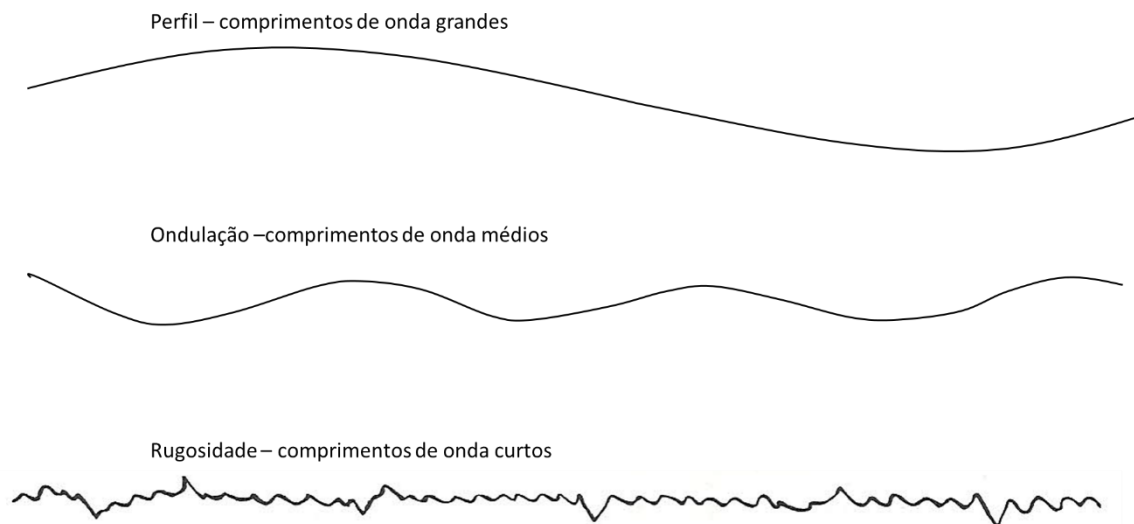


Figura 2.1: Entidades geométricas de diferentes escalas [1].

A figura 2.1 ilustra as diferenças entre as entidades macroscópicas, representadas pelo perfil, as microscópicas, representadas pela rugosidade e as intermediárias, representadas pela ondulação.

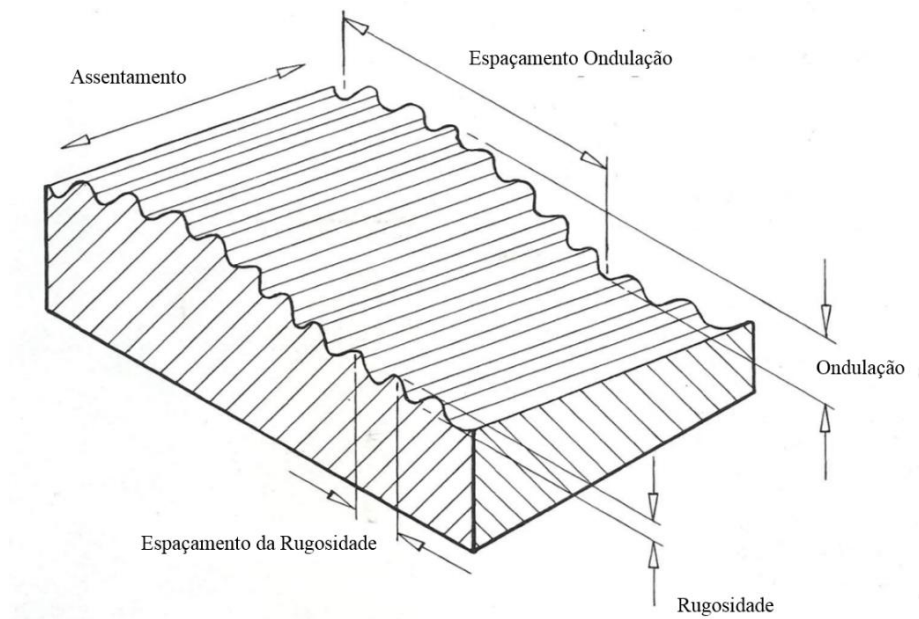


Figura 2.2: Modelo de superfície e suas características geométricas [1].

A figura 2.2 exhibe os principais elementos que constituem as superfícies típicas de engenharia, com destaque para a rugosidade, a ondulação e o assentamento. A rugosidade é composta de irregularidades oriundas do processo de remoção de material. A ondulação, componente sobre a qual a rugosidade é superposta, resulta de deflexões das máquinas de usinagem ou suas partes, vibrações, deformações do material e fatores externos. Por último, o assentamento é tido como a direção do padrão dominante e está também relacionado com a forma de produção da superfície.

O exemplo mais simples de superfície com padrão dominante é o daquela produzida por torneamento. Independente dos parâmetros da usinagem, esta operação tende a formar uma topografia espiralada, portanto, com propriedades direcionais. A estas superfícies também se atribui a classificação de anisotrópicas. Por outro lado, superfícies produzidas por jateamento abrasivo, lixamento multidirecional ou lapidação tendem a apresentar aspecto isotrópico, não possuindo qualquer assentamento preferencial.

Nos sistemas de medição e qualificação de superfícies, estas entidades são separadas em função de seus comprimentos de onda, por meio da aplicação de filtros de sinais. O filtro utilizado para distinguir as entidades entre aquelas consideradas rugosidade daquelas consideradas ondulações é chamado de “cut-off” (já considerando que erros de forma são de ordens muito maiores que estas). Ele se refere ao comprimento de onda máximo aos quais os elementos do perfil passam sem modificações. Os principais

fabricantes de sistemas de medição de rugosidade já informam, antecipadamente, as recomendações de filtros para diversas combinações de rugosidades esperadas.

Tabela 1: Valores recomendados para o *cut-off*.

Valores de cut-off recomendados					
Perfis Periódicos	Perfis Não Periódicos		Cut-off	Comprimento de Amostragem Rugosidade	Comprimento de Avaliação Rugosidade
RSm (mm)	Rz (μm)	Ra (μm)	lc (mm)	lr (mm)	ln (mm)
0.013 - 0.04	até 0.1	até 0.02	0.08	0.08	0.4
0.04 - 0.13	0.1 - 0.5	0.02 - 0.1	0.25	0.25	1.25
0.13 - 0.4	0.5 - 10	0.1 - 2.0	0.8	0.8	4
0.4 - 1.3	10 - 50	2 - 10	2.5	2.5	12.5
1.3 - 4.0	50	10	8	8	40

Ao se avaliar apenas um trecho linear desta superfície, pode-se identificar as microformas que compõem a rugosidade. Em escala micrométrica, a superfície tem o aspecto altamente irregular, variando entre picos e vales de alturas e profundidades variadas. Um procedimento inicial para efetuar as medições destes valores é estabelecer uma referência. A “linha de centro” ou “linha média” é então definida como a linha que divide igualmente a quantidade de material acima e abaixo dela. As medidas principais de rugosidade terão como base a distância para a linha média. Um valor típico, a rugosidade média aritmética ou Ra , está ilustrada na figura 2.3 abaixo:

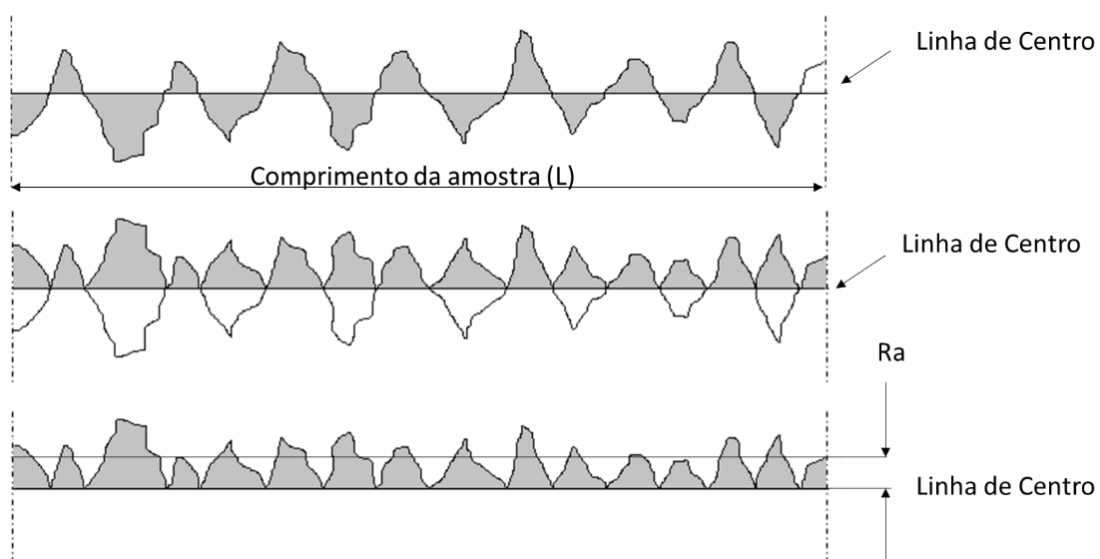


Figura 2.3: Derivação da média aritmética Ra [1].

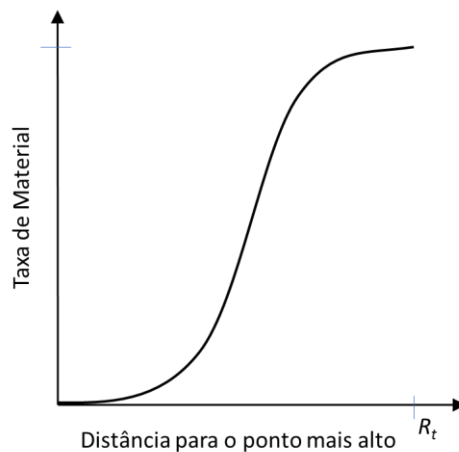


Figura 2.4: Curva de taxa de material ou Abbott-Firestone, adaptado de [1].

A área real de contato pode ser estimada a partir da curva de taxa de material ou de Abbott-Firestone, exibida na figura 2.4. Para cada altura do perfil, ela informa a quantidade de material acumulada em relação à linha média. Esta curva, no entanto, não considera nenhum tipo de deformação.

Já os picos, chamados também de asperidades, são definidos como as entidades de maior valor absoluto num trecho que compreende uma sequência de pontos que cruza a linha média duas vezes. Esta definição fica mais clara ao observarmos a figura 2.5:

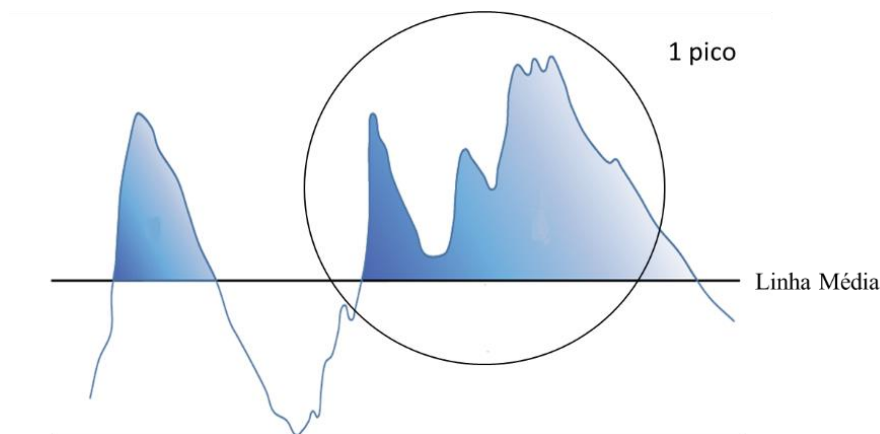


Figura 2.5: Definição de pico. Fonte: Autor.

Dentre as principais grandezas que descrevem a rugosidade das superfícies, pode-se listar as variáveis de rugosidade aritmética média, média quadrática, distância máxima

pico-vale, profundidade máxima dos vales, altura máxima dos picos, assimetria da distribuição de alturas, curtose da distribuição de alturas e número de picos por centímetro.

A medida de assimetria indica se o “*bulk*”, ou base do material, está acima ou abaixo da linha média. Desta forma, permite fazer distinção entre superfícies que possuam, por exemplo, valores semelhantes de Ra , mas tenham formas diferentes. Um valor de assimetria negativa indica que a base do material está acima da linha média, ou seja, uma superfície densa e com poucos picos. Já um valor de assimetria positiva indica que a base do material está abaixo da linha média e que a superfície apresenta densidade maior de picos. Os dois casos podem ser vistos na figura 2.6 abaixo:

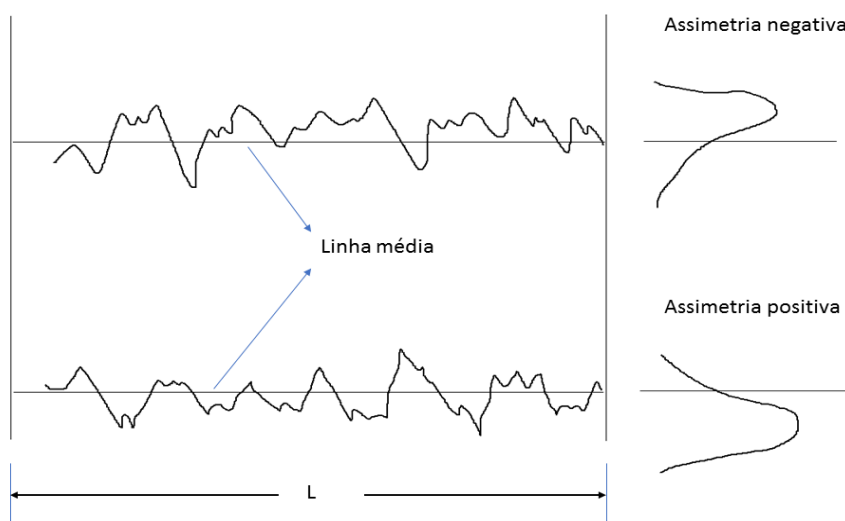


Figura 2.6: Exemplos de superfícies com distribuições de alturas assimétricas. Fonte: Autor.

O parâmetro curtose é outro que classifica a distribuição das alturas das asperidades. É um parâmetro comumente associado ao grau de “achatamento” da curva de distribuição e mostra uma medida de concentração de valores em torno da média. Para a distribuição normal, o valor da curtose é igual a três. Valores de curtose iguais ou superiores a três indicam a mesma concentração de valores próximos à média.

2.2 Escala de Observação

Tendo visto os principais parâmetros de descrição topográfica das superfícies, é importante abordar outro aspecto relevante para o tema: a escala de observação. Este assunto é objeto de diversos estudos e contribui para a percepção de que a parametrização

adequada de uma superfície é ainda mais complexa do que a simples medição de picos e vales.

Ao olhar para um contato entre superfícies planas e com bom grau de acabamento (e.g., retificadas), a impressão que é de que o contato aparente é de 100% entre as faces. Ao ampliar-se a magnificação, vê-se que o contato se dá, na verdade, por pequenas protuberâncias na superfície, irregularidades que podem ter diversas origens, mas comumente associadas aos processos de fabricação.

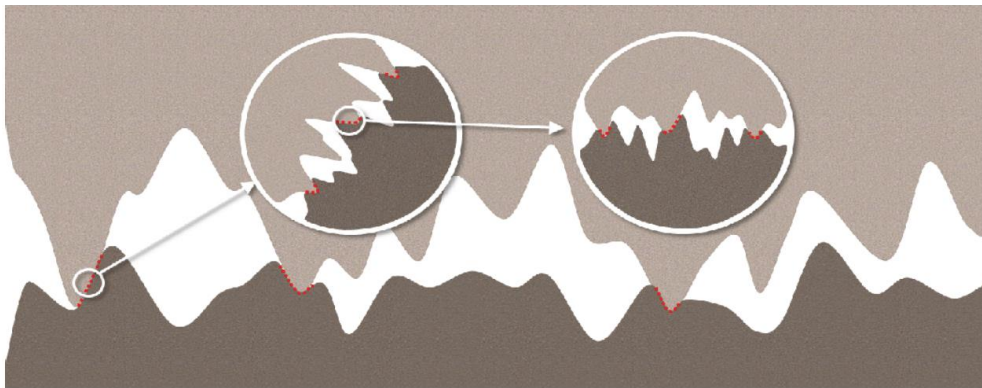


Figura 2.7: Ampliações sucessivas do contato aparente [2].

A figura 2.7 ilustra esta situação. Após sucessivas ampliações dos contatos, nota-se que eles são semelhantes, mas cada vez em menor escala. Esta característica sucessiva foi associada à geometria fractal pelo matemático Mandelbrot e, desde então, os estudos mais recentes fazem uso desta semelhança para construir numericamente elementos representativos de superfícies reais.

Topografias fractais são aquelas que apresentam equivalência estatística, exceto por um fator de escala na direção da altura dos picos. Decorre da definição que, quando a estrutura principal é mantida de forma proporcional em todas as direções, a geometria é dita auto similar. Quando tal proporção não ocorre, é chamada de auto afim. Esta tem sido extensivamente utilizada para a geração numérica de superfícies. Além de facilitar a alteração paramétrica e a diversidade de superfícies representadas, tal técnica incorpora a natureza multi-escalar, dando maior amplitude de aplicação aos modelos assim construídos.

Um dos autores mais expressivos na atualidade, PERSSON faz uso desta técnica em todos os seus trabalhos. Numa revisão das teorias de contato [3], ele compara os

resultados dos diversos modelos passados considerando que podem ser utilizadas as componentes da geometria fractal para descrever as superfícies.

Em outra publicação, ele investiga a relação entre a separação interfacial e a carga, também modelando as superfícies como fractais auto afins [4]. Nesta, apresenta uma relação exponencial entre estes parâmetros utilizada também nos trabalhos por ele desenvolvidos no campo de vazamentos, como será visto posteriormente.

Ainda entre seus estudos, PERSSON e YANG [5] revisam novamente as teorias de contato levando em consideração o aspecto multi-escalar das superfícies por meio da modelagem da geometria fractal. Seus resultados não acomodavam as irregularidades de menor escala, por isso, apresentam divergências quando comparados com as teorias clássicas. Ao deformarem, tais irregularidades também contribuem para uma modificação na distância de separação efetiva entre os planos de referência. Além disso, pontuam que as teorias iniciais pressupunham que o núcleo destas superfícies era infinitamente rígido, o que não é verdade.

Da mesma forma, JACOBS *et al* [6] utilizaram esta descrição para realizar uma caracterização quantitativa da topografia superficial. Em seu trabalho, avaliam a dificuldade de se realizar a operação inversa, ou seja, obter as funções probabilidade de distribuição de alturas fazendo uso da densidade espectral de potência (PSD) a partir de medições reais de parâmetros de superfície. Abordam, principalmente, as dificuldades desta operação, tais como: diferentes métodos de obtenção das PSDs, limitações das técnicas de medição quanto à amostragem em relação à superfície total, os efeitos de borda e banda estreita de frequências e, por último, a imprecisão dos instrumentos de medição nas faixas de frequência mais altas.

Fica evidente, portanto, que a dimensão do problema de contato envolve o estabelecimento de alguns limites. Em outras palavras, um modelo generalista, que absorva todas as possíveis faixas de alturas e dimensões seria demasiadamente complexo e impreciso. Este limite, porém, guarda o mesmo nível de dificuldade para ser estabelecido. Isto se deve, em parte, às limitações práticas das técnicas de mapeamento topográfico. Comparar, portanto, os resultados de modelos numéricos multi-escalares com a natureza de perfis reais medidos com instrumentos de alcance e precisão limitados é tarefa árdua.

Em [7], PAWLUS e ZELASKO estudaram os modelos de contato e a forma como são afetados pela escolha do intervalo de amostragem. Pontuam que mesmo os modelos multi-escalares podem não atingir convergência para superfícies reais. Em seu trabalho, variando o tamanho do intervalo entre 5 μm e 40 μm , perceberam que um aumento deste intervalo leva à diminuição do índice de plasticidade e diminuição do desvio padrão das alturas das asperidades. Além disso, também ocorre diminuição da separação efetiva entre superfícies para uma mesma carga aplicada. Estes fatores levaram os autores a sugerirem um procedimento de busca pelo melhor intervalo, começando com o menor possível. Também fornecem referências para checagem da correlação entre pontos vizinhos.

2.3 Mecânica de Contato

As teorias de contato têm como pedra fundamental a teoria de Hertz. Nela, dois tipos particulares de contato foram estudados: a linha contato e o ponto contato. A formulação das premissas e o equacionamento das tensões desenvolvidas no contato foram fundamentais para o salto de qualidade no projeto mecânico de componentes de máquinas. No entanto, a teoria de Hertz foi elaborada com premissas limitantes, tais como pequenas deformações, regime apenas elástico, superfícies sem atrito, contato não adesivo entre outros. Uma visão simplificada do contato de Hertz pode ser vista na figura 2.8.

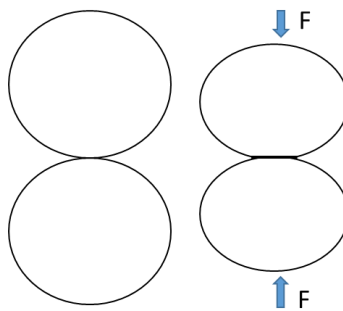


Figura 2.8: Modelo de contato de Hertz. Fonte: Autor.

Diversos autores têm trabalhado na modelagem da mecânica de contato de superfícies. Destaca-se nesta área o trabalho desenvolvido por GREENWOOD e WILLIAMSON [8], que foi fundamental para uma nova visão sobre os fundamentos do contato entre superfícies.

Em seu trabalho, GREENWOOD e WILLIAMSON [8] questionam o modelo de

Hertz no que diz respeito à premissa de contato puramente elástico. Eles afirmam que deve haver alguma deformação plástica nos contatos e que somente após esta deformação permanente as deformações elásticas que ocorrem em seguida são capazes de equilibrar a carga aplicada.

Esta deformação inicial estaria associada ao fato de que os primeiros contatos se dão nas asperidades mais altas. Supondo que a distribuição das alturas das asperidades é normal, as asperidades mais altas (mais afastadas da média) representariam uma área de suporte menor, resultando em tensões mais altas. À medida em que estas asperidades mais altas vão sendo deformadas (elástica e plasticamente) e as superfícies se aproximando, novas asperidades entram em contato, aumentando a área efetiva de suporte da carga, diminuindo a tensão local e mantendo então o regime elástico pelo resto do processo.

Como se pode ver, a distribuição de alturas de forma Gaussiana é uma premissa importante neste modelo. Além disso, é descrito um mecanismo bastante razoável de ocorrência de deformação plástica. Os autores modelaram o contato assumindo uma nova e importante premissa: as pontas das asperidades tem formato esférico e raio constante. Isso permitiu a eles calcular o exato momento em que ocorre a deformação plástica no contato. Esta indicação é obtida por meio do índice de plasticidade, um fator que leva em consideração os módulos de elasticidade e a dureza dos materiais. O índice é dado pela equação (1) abaixo:

$$\psi = \frac{E^*}{H} \sqrt{\frac{SD}{\beta_a}}, \quad (1)$$

na qual

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}, \quad (2)$$

Este foi um dos primeiros trabalhos a abordar o problema de contato de forma estocástica e sua simplicidade e universalidade inspiraram sucessivos modelos de contato e de fenômenos tribológicos.

Outro aspecto importante do contato entre superfícies é a área efetiva de contato. Pelo modelo de GREENWOOD E WILLIAMSON, a área efetiva é menor que a área nominal em função do mecanismo descrito de interação sequencial entre picos de maior

altura e aumenta à medida em que a carga imposta aumenta. Em seu trabalho, esta relação foi obtida como essencialmente linear. Diversos trabalhos seguiram na tentativa de estabelecer a real relação entre as áreas nominal e efetiva e sua relação com o desempenho tribológico e de vedação entre superfícies em contato. A figura 2.9 ilustra a visão macroscópica, na qual se assume contato pleno entre as faces dos discos e suas áreas nominais. A figura 2.10 mostra os aspectos topográficos das duas superfícies, evidenciando que a área real de contato é menor que a área nominal.

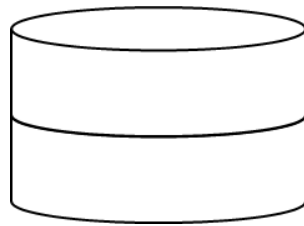


Figura 2.9: Duas superfícies (discos) em contato. Fonte: Autor.

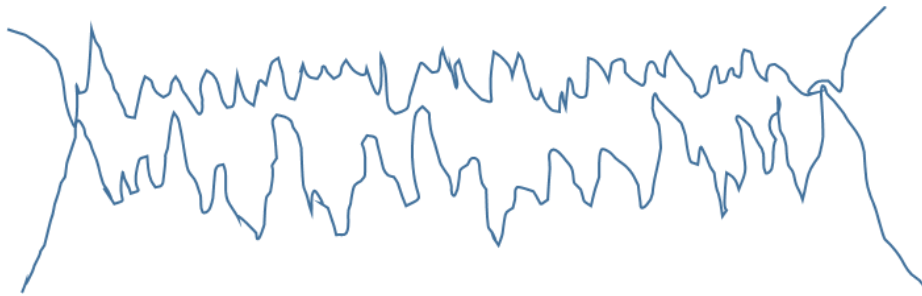


Figura 2.10: Visão microscópica do contato entre as superfícies através da rugosidade.

Fonte: Autor.

KUCHARSKI [9] *et al* propuseram uma metodologia interessante para determinação da área real de contato. Os parâmetros de superfície são medidos antes e depois da aplicação da carga. Inicialmente eles verificaram a hipótese do modelo GREENWOOD E WILLIAMSON de que a distribuição das alturas das asperidades era essencialmente gaussiana. Levantaram também a curva de taxa de material, que avalia a distribuição de material ao longo do trecho medido no corpo de prova. Após a aplicação e remoção de carga, executada em vários níveis, eles notaram a modificação da curva de distribuição de alturas e atribuíram as alterações à deformação plástica sofrida pelas asperidades mais altas. Esta deformação altera a configuração de contato. Sua

metodologia consiste em reavaliar a configuração deformada com a curva de taxa de material inicialmente aferida. Como a referência das duas distribuições é o comprimento do substrato, o ponto onde a distribuição de alturas foge da normal indica uma nova concentração de alturas e é avaliado na curva da taxa de material onde a área efetiva de contato pode ser estimada. A figura 2.11 ilustra este procedimento por meio das linhas retas horizontal e vertical.

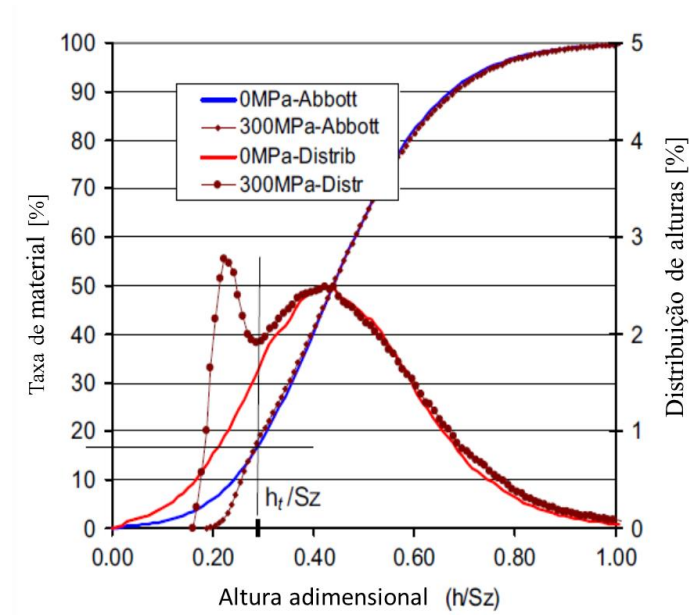


Figura 2.11: Metodologia para avaliação da área real de contato (adaptado de [9]).

Em 1991, KLIMCZAK *et al* [10] conduziram alguns experimentos para validar o modelo GREENWOOD E WILLIAMSON de contato entre superfícies rugosas. Eles efetuaram pequenas modificações, no entanto, ao fazer uso de distribuição de alturas empírica e não gaussiana e por caracterizar as superfícies rugosas sob o aspecto tridimensional.

Dentre suas conclusões, eles afirmam que o modelo é adequado para contatos no regime elástico e mostram que a premissa de asperidades com formato esférico e raio constante é inadequada para algumas superfícies, como aquela gerada por torneamento, de grande assimetria. Assim, esta premissa leva a distribuição de alturas e densidade de picos equivocados para superfícies anisotrópicas.

Além da limitação para certos tipos de superfície, o modelo apresenta uma limitação em relação à carga máxima. Para cargas demasiadamente elevadas

(aproximadamente metade do limite de escoamento), os resultados experimentais divergem do modelo. Os autores atribuem o desvio ao aumento gradativo da contribuição das deformações plásticas que ocorrem a partir deste momento e que não são capturados pelo modelo baseado em regime elástico. Os gráficos estão mostrados nas figura 2.12 e 2.13 abaixo:

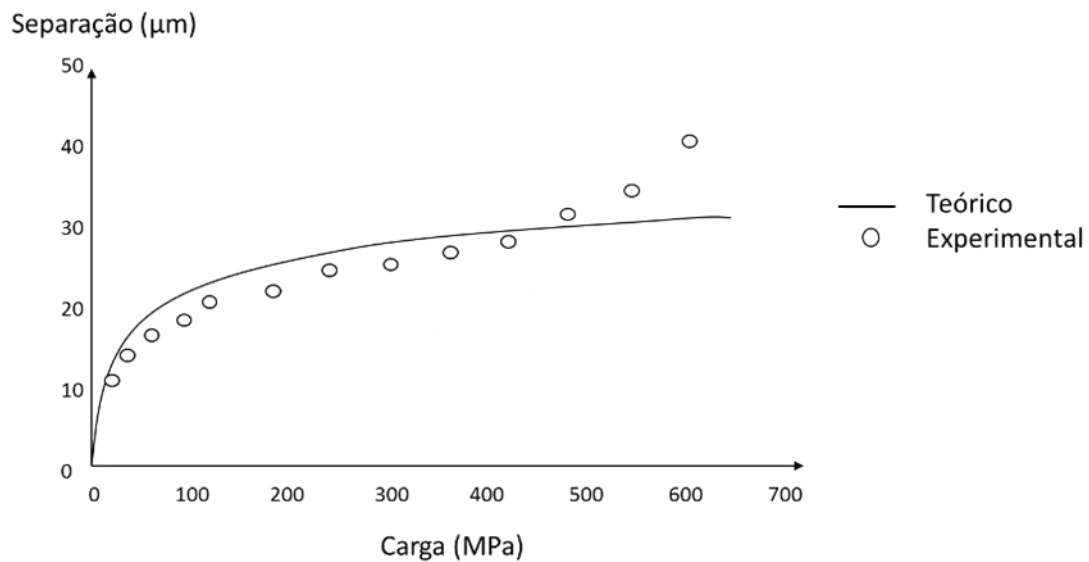


Figura 2.12: Divergência em altas cargas para o acabamento por torneamento [10].

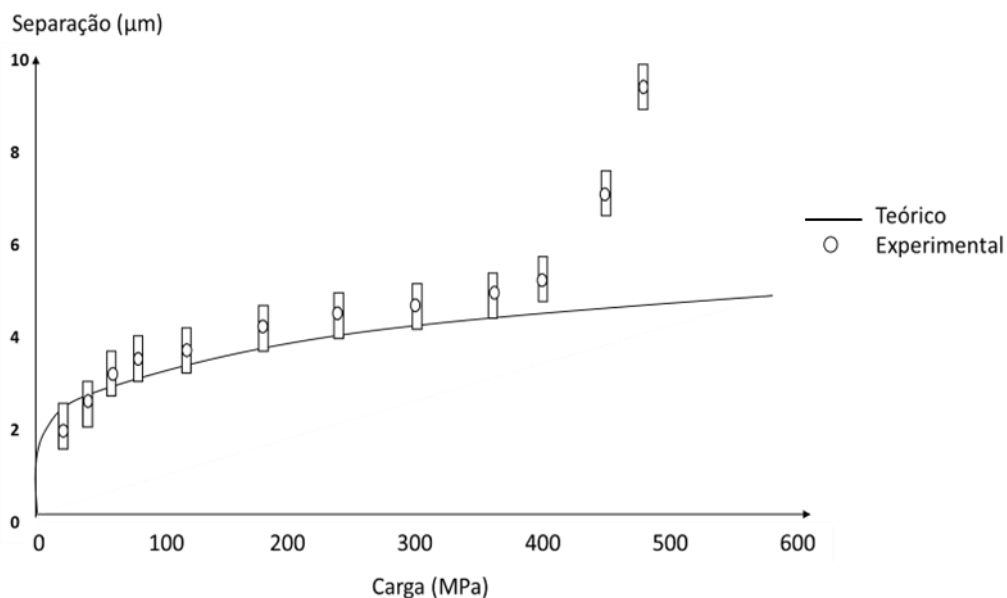


Figura 2.13: Divergência em altas cargas para o acabamento por jateamento abrasivo [10].

As premissas para caracterizar as asperidades mostraram-se fundamentais para o aperfeiçoamento dos modelos de contato. A sua padronização como formas semiesféricas de raio constante mostrou-se equivocada, mas ainda assim possuía uma faixa razoável de aplicação em baixas cargas.

Em busca de modelos mais realistas, diversos estudos apresentaram novas propostas. A natureza das superfícies de engenharia depende fortemente do processo de fabricação, o que pode induzir a erros nos modelos mais genéricos. Processos como torneamento, por exemplo, criam superfícies com padrões repetitivos de ranhuras e ondulações [11]. A abordagem para estes casos permite o uso de técnicas de avaliação de frequência destes padrões. A figura 2.14 mostra um exemplo de superfície torneada gerada numericamente.

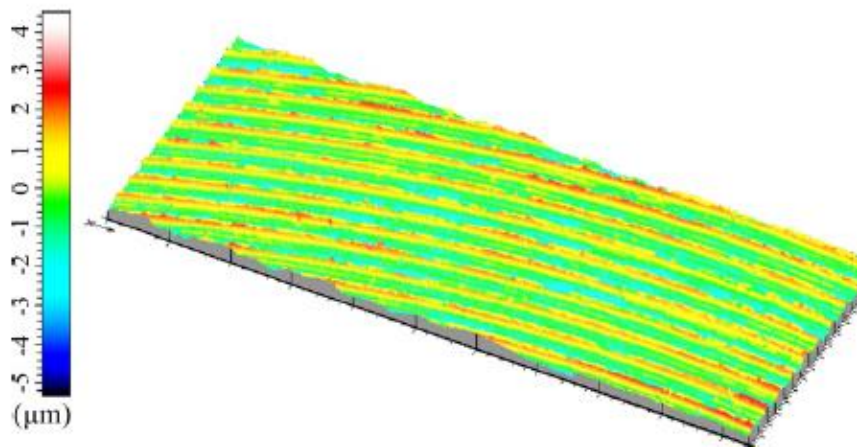


Figura 2.14: Modelo computacional de superfície gerada por torneamento [11].

Em 1971, NAYAK [12] propôs uma teoria para avaliar os parâmetros estatísticos de uma superfície baseado apenas numa avaliação perfilométrica. O procedimento consiste em calcular a densidade espectral de potência (PSD) da superfície e, efetuando o cálculo dos momentos da PSD, obter médias, variâncias e desvios padrão mais representativos. Segundo ele, uma superfície aleatória e isotrópica, com distribuição de alturas Gaussiana pode ser estatisticamente caracterizada por apenas dois parâmetros: a distribuição de alturas e a função de auto correlação. Se a função de auto correlação obedecer à lei exponencial, então bastariam o desvio padrão da distribuição de alturas e um comprimento de correlação.

Pouco depois, novos métodos para geração numérica de superfícies foram

propostos. Assim o fez PATIR [13] em seu trabalho publicado em 1977 cujo procedimento é utilizado até hoje. Naquela época ele apontava que as simulações numéricas seriam uma ferramenta promissora para análise de problemas relacionados a rugosidades em tribologia. Ele estabeleceu uma metodologia bastante ampla para geração de rugosidades, contemplando também a possibilidade de distribuições de alturas não Gaussianas.

Além do uso de processos aleatórios, como o PSD, modelos fractais também foram propostos. Nestes modelos, a dimensão fractal simboliza a característica geométrica intermediária entre asperidades conhecidas. Existem diversos métodos para se obter a dimensão fractal. ZHANG *et al* [14] estudaram dois destes métodos para uma superfície gerada numericamente e para outra superfície real. Eles avaliaram as diferenças sob o aspecto multi-escalar da rugosidade e sobre a dimensão fractal de cada uma. Em sua conclusão, eles pontuam que os métodos para obtenção da dimensão fractal divergem e apresentam, individualmente, resultados bastante diferentes daqueles medidos em superfície real.

Novamente em [6] os autores fazem um estudo detalhado sobre a técnica que utiliza a densidade espectral de potência (PSD). A PSD é a transformada de Fourier da função de auto correlação da distribuição das alturas das asperidades. Ela permite identificar as contribuições das diferentes frequências de distribuição no espaço ao longo do conjunto medido. Além disso, os autores argumentam que este processo permite coletar dados estatísticos da superfície de forma independente da escolha pessoal de um pesquisador.

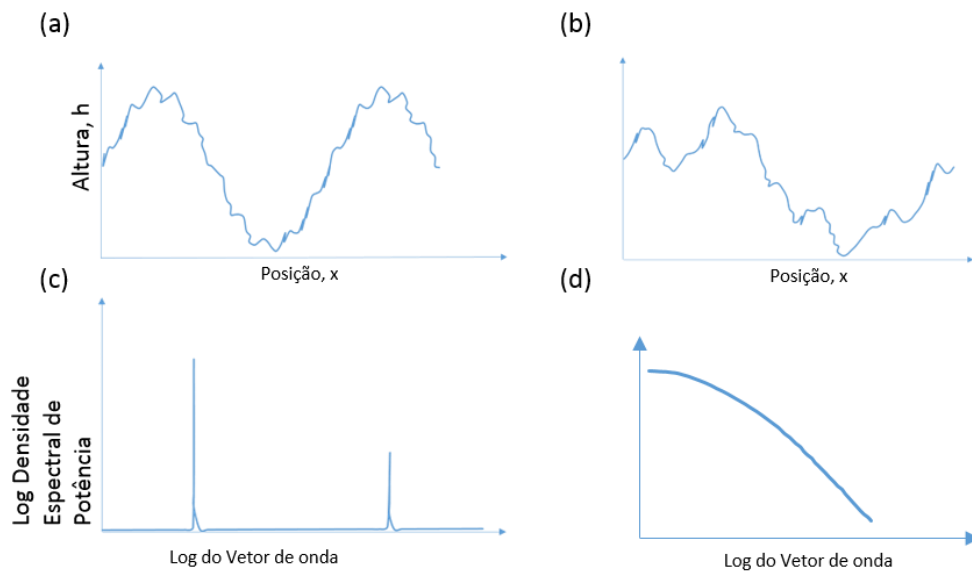


Figura 2.15: Medições perfilométricas lineares e suas respectivas PSDs [6].

A figura 2.15 mostra exemplos de superfícies com padrões superpostos (a) e perfis aleatórios (b) e suas respectivas PSDs ((c) e (d)).

É importante destacar o papel das técnicas de medição de rugosidade na caracterização das superfícies. A forma de executar as medições pode impactar os resultados e influenciar análises posteriores de separação, área real de contato, tensões efetivas, etc. Em 2011, DURAKBASA *et al* [15] conduziram um estudo comparativo entre três técnicas distintas de avaliação de superfície. Foram comparados os resultados de medições efetuadas com perfilômetro de contato, microscopia confocal de escaneamento a laser (CSLM) e microscopia de foco infinito (IFM). Em seu trabalho, foram utilizados corpos de prova planos e esféricos. A conclusão é de que para superfícies planas, com bom grau de acabamento e livre de danos, os métodos apresentam resultados semelhantes para a rugosidade média. A figura 2.16 apresenta as medições realizadas pelos três instrumentos, separadas por retas verticais. Os autores também concluíram que a periodicidade das superfícies não afeta o valor da rugosidade Ra , justamente por esta ser um valor médio. Já no que diz respeito à profundidade máxima dos vales, as técnicas óticas mostraram-se mais precisas, uma vez que existe uma limitação das pontas de prova para o equipamento de perfilometria de contato.

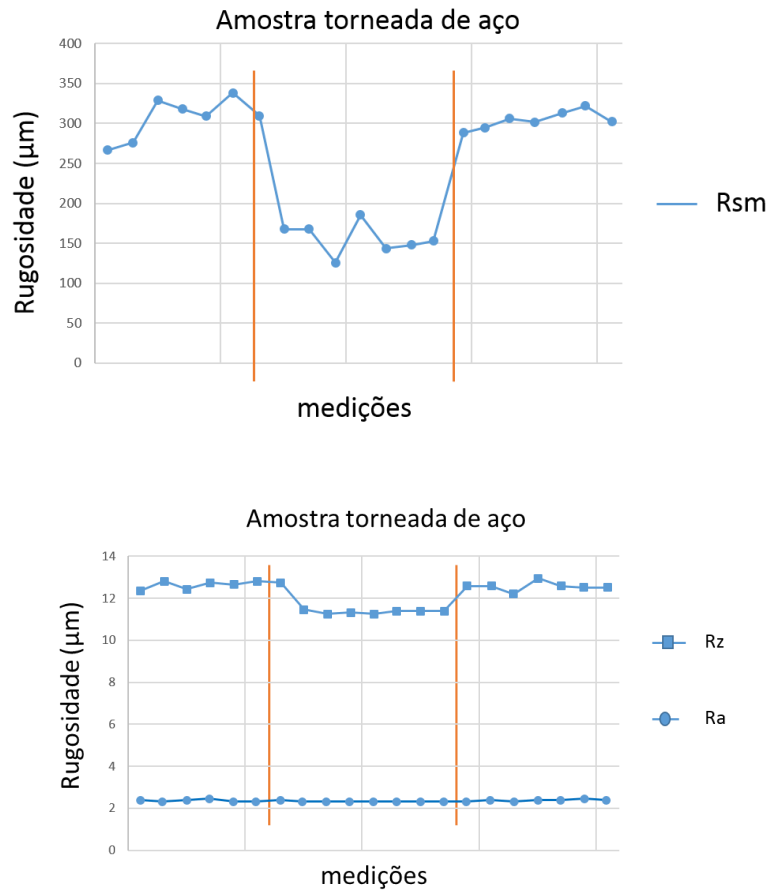


Figura 2.16: Comparação de leituras para três tipos de instrumentos [15].

A figura 2.16 mostra as leituras feitas por perfilometria, CSLM e IFM separadas por barras verticais, para facilitar a comparação visual.

Em 2007, CIULLI *et al* [16,17] propuseram cinco diferentes métodos para caracterizar a geometria das asperidades, baseados nas equações de parábolas. Por meio de comparações com perfis de superfícies reais, eles conseguiram boa aproximação em dois métodos. Os modelos determinísticos frequentemente apresentam mais dificuldade de representação do que os modelos estatísticos. Para minimizar os erros, eles precisam ser aplicados a toda a superfície. A figura 2.17 mostra a ideia por trás da parametrização por meio de parábolas.

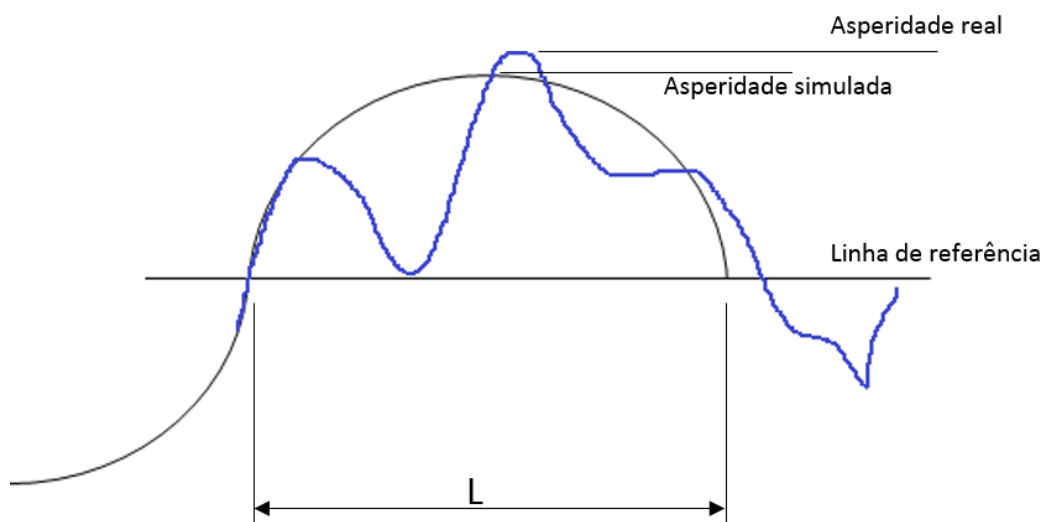


Figura 2.17: Modelo para aproximação parabólica das asperidades [16].

Recentemente, uma nova teoria da mecânica de contato foi desenvolvida por PERSSON [4]. Em sua teoria geral de mecânica de contato, ele utilizou técnicas citadas anteriormente, principalmente a de NAYAK [12], para estabelecer uma metodologia robusta de análise de contato entre superfícies rugosas. Além disso, utiliza a mecânica estatística para contabilizar os principais parâmetros de superfície e trata os escoamentos interfaciais com dinâmica molecular. A modelagem é bastante complexa e de difícil aplicação prática, mas em seus estudos, principalmente quando aliados a métodos numéricos, tem obtido boa correlação com resultados experimentais.

2.4 Vazamentos

Um dos temas abordados nos estudos de caracterização de superfície é o desenvolvimento de modelos matemáticos de vazamentos, especialmente na mecânica do contato. Modelos de escoamento em interfaces ou canais também procuram equacionar o problema de vazamento.

A condição essencial para ocorrência de vazamento é a existência de um caminho contínuo para passagem de um fluido de um lado ao outro da barreira. Quando duas superfícies estão em contato, macroscopicamente considera-se a área nominal de contato como barreira integral. Em seu trabalho sobre a taxa de vazamento de selos elastoméricos, PERSSON e YANG [18] incluem um fator de magnificação na modelagem da área efetiva de contato. Por sua vez, esta área será utilizada para calcular a taxa de vazamento estimada para cada interface avaliada. A figura 2.18 mostra o efeito da magnificação

progressiva.

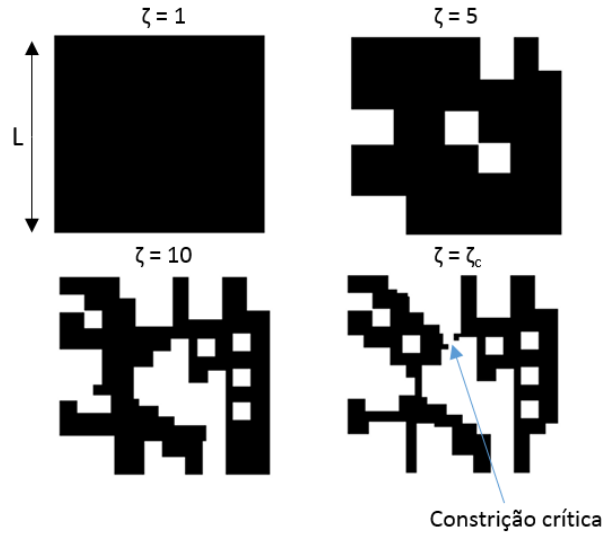


Figura 2.18: Aumentando a magnificação, a área real de contato (em preto) diminui, mostrando as regiões por onde pode haver migração de fluido [18].

Alguns estudos estabeleceram modelos de vazamento para serem avaliados numericamente. São modelos que dividem a região da interface em células unitárias e atribuem duas condições aleatórias a estas células: a de região bloqueada ou não bloqueada ao fluxo. Se ao longo do domínio existir um caminho contínuo de células não bloqueadas entre os lados com e sem fluido, então o resultado desta condição é de que há vazamento, sendo o oposto verdadeiro quando tal caminho não existe. Um exemplo é o de OKADA *et al* [19]. A vedação testada é para componentes eletrônicos que são vedados a vácuo. O modelo se baseia na determinação dos pontos de contato. O domínio é dividido em blocos e para cada um deles é testada a ocorrência de contato baseada na soma das asperidades de cada superfície na interface. Havendo contato entre blocos adjacentes, forma-se a barreira que garantirá a vedação. O contato é definido por meio de simulações de Monte-Carlo para as probabilidades em cada célula.

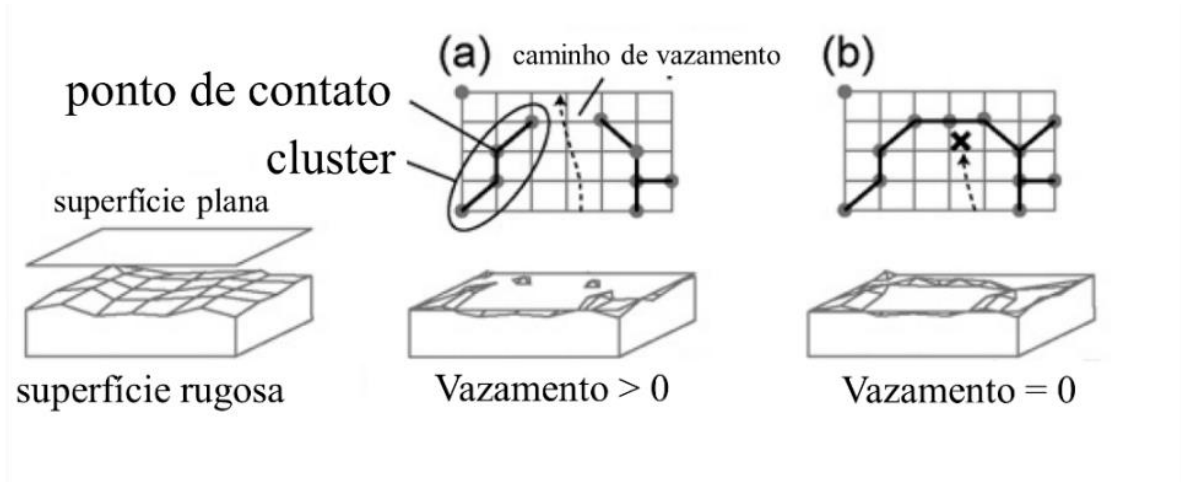


Figura 2.19: Diagramação dos pontos de contato e caminhos de vazamento [19].

A figura 2.19 mostra como o contato entre uma superfície perfeita e outra rugosa gera pontos de contato. A formação de pontos adjacentes pode construir uma barreira ao escoamento.

Diversos modelos foram elaborados para avaliar o vazamento de contato entre superfícies rugosas. A análise é sempre baseada na área de passagem e no diferencial de pressão experimentado pelo fluido através da interface. Em termos de superfície, o parâmetro de aplicação significativa é a separação média, uma função das rugosidades superficiais, extremamente difícil de se obter experimentalmente. Os demais fatores de cada modelo variam em função da abordagem para a geometria de contato ou da forma de divisão do domínio. O modelo de escoamento utilizado também pode alterar a forma da estimativa de vazão, como feito por ARMAND *et al* [20]. Em seu trabalho sobre vácuo, eles avaliaram a relação entre o vazamento de gás por uma interface metálica e a micro geometria superficial. Com pressões de trabalho abaixo da atmosférica, sua premissa foi de escoamento molecular, onde há uma série de trabalhos e técnicas para cálculo da condutividade para diversas geometrias de canal. O modelo foi ajustado para que o parâmetro de superfície R_p fosse incorporado e uma relação direta entre este e a taxa de vazamento pudesse ser estabelecida.

Modelo de ARMAND *et al* [20]:

$$C = \frac{8}{3} \pi \bar{V} \frac{1}{k_e(\omega_1 + \omega_2) \log(r_2/r_1)} \sum_{\gamma=1}^n \frac{(R_{p2\gamma} + R_{p1\gamma} - m)^2}{n}, \quad (3)$$

$$\omega = \frac{L_D}{L}, \quad (4)$$

$$R_m = \frac{1}{L} \int_0^L e(x) dx, \quad (5)$$

O modelo proposto em [21] é muito semelhante à equação de Darcy para escoamento em meios porosos, de forma que os autores também denominam de permeabilidade o parâmetro fundamental do problema de fluxo:

Modelo de PEREZ-RÀFOLS *et al* [21]:

$$Q = \frac{\pi D \Delta p_f}{\eta} K, \quad (6)$$

$$K = \frac{1}{L_x} \frac{1}{L_y} \frac{1}{12} \int_{\Omega} h^3 \frac{\partial p}{\partial x} dx dy, \quad (7)$$

$$h = \hat{h}_1 + h_1 + u - g_{00}, \quad (8)$$

Existem artigos tratando o vazamento sob a teoria da percolação. Nela, consideram que o emaranhado de câmaras (vazios) tende a aumentar conforme se aumenta a separação interfacial, partindo do contato perfeito. A um certo valor crítico, o limite de percolação (*percolation threshold*), tem início a primeira conexão de longo alcance entre as câmaras, permitindo, portanto, o fluxo através do caminho agora conectado. Esta condição está intimamente ligada à aplicação da carga e à sua relação com a área real de contato. O valor frequentemente apontado como limite de percolação é aquele em que a razão entre área nominal e área real de contato é da ordem de 0,5. Para este limite, o objetivo é encontrar a separação interfacial crítica associada e, somente então, efetuar os cálculos de vazão em função desta abertura.

PERSSON e YANG [18] apresentaram uma teoria para a taxa de vazamento de selos considerando escoamento molecular e a teoria do primeiro [3] sobre a mecânica do contato. Eles pontuam que as simulações computacionais com superfícies geradas numericamente tendem a superestimar a área de contato em função da carga aplicada. Em seus resultados, chegam ao limite de percolação da ordem de 0,4, próximo, mas inferior ao valor de referência.

Em seu estudo, PUTIGNANO *et al* [22] apontam que os modelos clássicos, ao abrirem mão de considerar a deformação elástica das superfícies, podem superestimar o valor do limite de percolação. Ao apresentar uma nova metodologia que considera este aspecto, eles demonstram que o limite pode ser, na verdade, inferior, da ordem de 0,36.

Seus cálculos utilizaram superfícies geradas numericamente e calibradas com medições de rugosidade de superfícies reais.

Outro aspecto importante e que deve ser discutido está ligado aos métodos de detecção de vazamento utilizados nos trabalhos experimentais. Em geral, complexos e caros sistemas de espectrometria de massa são utilizados para quantificar a mais sutil presença de gás oriundo de um sistema de vedação. Isto se deve, em parte, ao fato de que a escala dos experimentos tende a ser pequena, pois a busca pelo mecanismo que permite a passagem de fluido numa interface avança sempre em direção a um caminho ou passagem limite, para a qual uma diferença de pressão mínima é necessária. Em alguns casos, pressões abaixo da atmosférica foram utilizadas nos testes.

Fato é que, em grandes sistemas industriais, o monitoramento dos vazamentos se dá de outras formas. Para gases perigosos, há o uso de sensores específicos, que apontam a sua presença medindo a concentração na atmosfera local. A vazão deste vazamento é, portanto, informação secundária. Outro meio bastante comum de detecção de perda de fluido é por meio da variação da pressão em certos pontos de medição. Para o caso de gases, é preciso considerar as variações de temperatura ao longo do trajeto para quantificar adequadamente a variação de pressão. Em sistemas de armazenamento, a queda de pressão é o método mais comum de detecção de vazamento, pelo simples fato de que esta medida é altamente disponível em sistemas industriais e de fácil automação (monitoramento remoto).

Em seu artigo [23], PREGELJ *et al* destacam que não há sistema absolutamente hermético e pontuam algumas fontes de vazamento, como defeitos no sistema de vedação, uniões imperfeitas em elementos novos e materiais que permitem permeação e difusão de gás. Além disso, abordam a aleatoriedade da distribuição de tais defeitos e a dificuldade de se replicar estas condições em modelos, a não ser aqueles com premissas simplificadoras e para efeito de calibração. Como o trabalho trata de detecção em sistemas de baixa pressão, as unidades de vazamento frequentemente estão relacionadas com o incremento de pressão de Hélio em um dispositivo de detecção.

Apesar disso, apresentam uma comparação entre métodos de quantificação onde o monitoramento da queda de pressão pode atingir precisão da ordem de 10^{-2} mbar.l/s. Ou seja, mesmo um método simples pode apresentar sensibilidade satisfatória para

pressões altas de teste. Desta forma, fica claro que para os níveis de pressão a serem utilizados no experimento, o grau de precisão típico dos instrumentos industriais atende aos objetivos do trabalho. Este parâmetro será revisitado na seção de apresentação de resultados.

2.5 Experimentos Realizados

MARIE e LASSEUX, em [24], propuseram um experimento de construção simples como modelo para medição de vazamentos de pequena magnitude. O aparato consistia de uma câmara que continha o par de teste, no caso, um elemento considerado perfeitamente plano (safira) contra um elemento metálico rugoso. Um fluido solvente circula pelo exterior do sistema de vedação enquanto outro (soluto) é injetado pelo interior. Amostras do líquido externo são colhidas periodicamente e analisadas para medir a contaminação, fruto do vazamento pela interface.

O objetivo do trabalho era validar a estrutura de testes de alta precisão para pequenos vazamentos de líquidos, comparando a capacidade do aparato com as medições de vazamento de gases realizadas com cromatografia gasosa. A figura 2.20 mostra os elementos utilizados na construção do experimento.

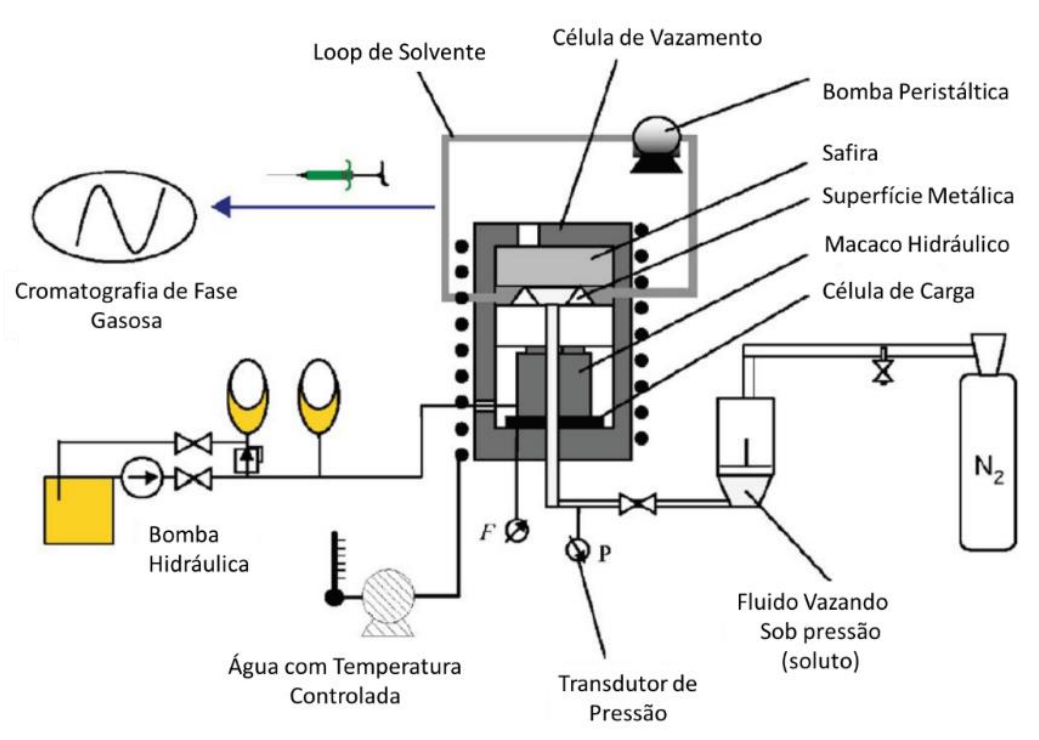


Figura 2.20: Estrutura de teste, adaptado de [24].

Já no trabalho de ARMAND *et al* [20], um experimento feito a baixas pressões avaliou a relação entre o vazamento de gás pela interface de vedação entre aço e cobre e a força de fechamento. A figura 2.21 mostra uma vista de seção do experimento, onde se pode ver dois flanges contendo um anel de vedação.

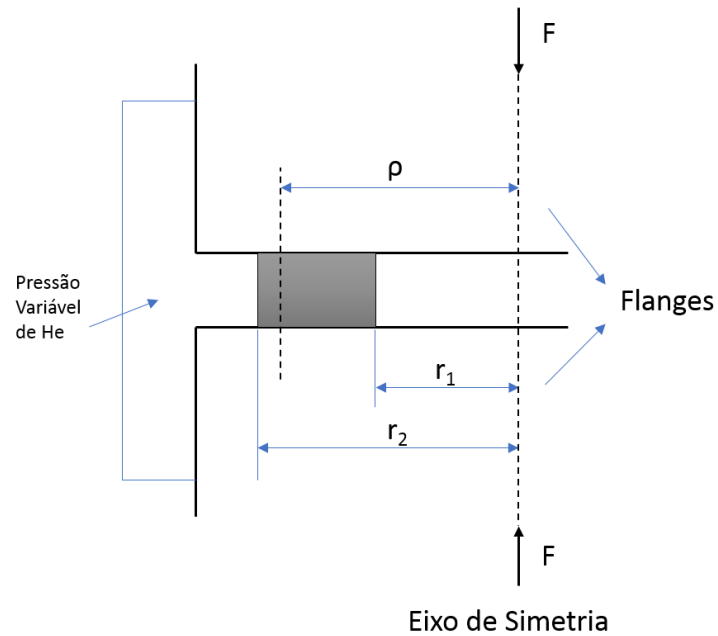


Figura 2.21: Modelo experimental utilizado [20].

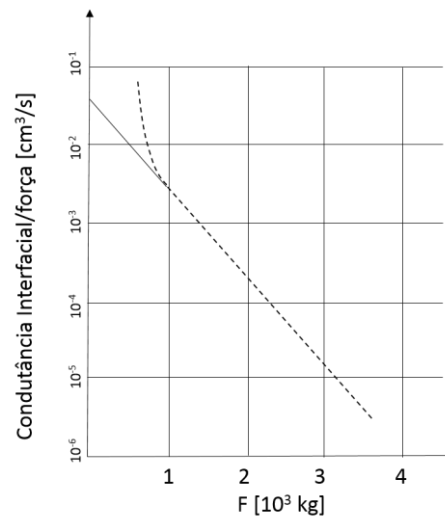


Figura 2.22: Taxa de vazamento x Força de fechamento [20].

A figura 2.22 exhibe o resultado obtido para a relação entre a taxa de vazamento observada e a força de fechamento aplicada, sendo esta linear em praticamente toda a faixa testada.

Ainda em [21], foi realizado numericamente o estudo do vazamento em pares metálicos em superfície gerada por torneamento. Eles dividiram o problema em duas fases: a primeira identifica as deformações e a folga obtida após o contato sob carga; a segunda considera o escoamento de fluido pela folga gerada. Em seu trabalho, concluíram que a ondulação característica da superfície altera significativamente a resposta em vazamento. Afirmam também que a separação média entre as superfícies em nada afeta a taxa de vazamento pois, neste caso, a separação é governada pela ondulação.

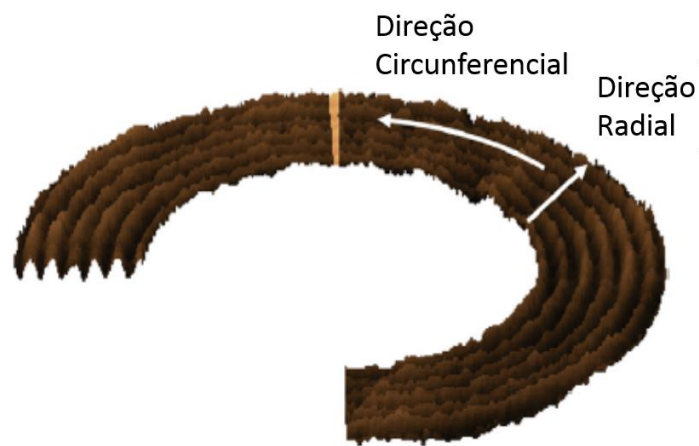


Figura 2.23: Superfície torneada gerada numericamente [21].

A figura 2.23 mostra em detalhes a topografia gerada numericamente para superfícies torneadas, com variação de altura no sentido radial, por onde poderia haver escoamento e consequentemente, vazamento.

Neste estudo foi feita uma avaliação da influência da dureza, na forma de uma razão entre carga aplicada e dureza nominal. Esta relação indica indiretamente o grau de esforço necessário para atingir uma determinada taxa de vazamento, expressa na forma de permeabilidade.

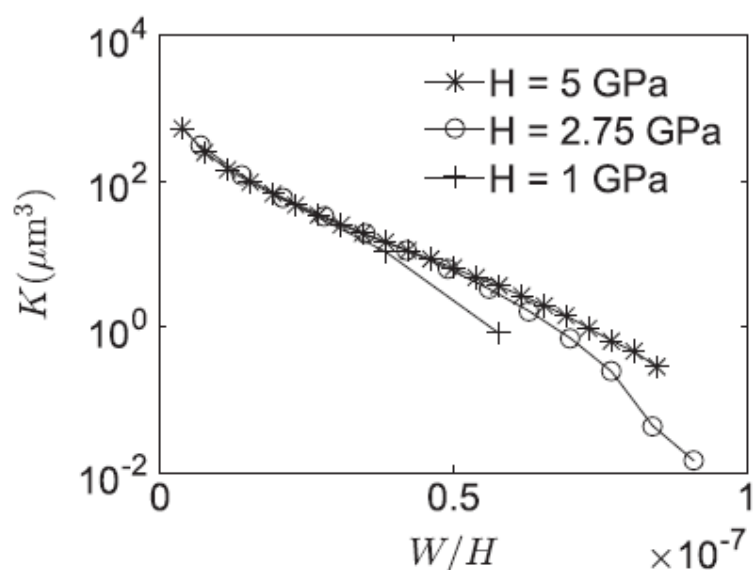


Figura 2.24: Influência da dureza sobre a permeabilidade [21].

A figura 2.24 mostra os resultados obtidos para diferentes valores de dureza, evidenciando que para uma ampla faixa de valores da razão entre carga e dureza, os valores de permeabilidade são os mesmos.

Em [25], MATSUZAKI *et al* investigaram a geometria ótima da vedação metálica tipo selo ponta de faca. Eles estudaram as características geométricas da borda de contato do anel metálico buscando entender como elas afetavam o desempenho de vedação. Após a obtenção da melhor configuração, eles produziram um anel em aço liga revestido com carbeto de titânio e nitreto de titânio. O desempenho do anel foi verificado contra três materiais diferentes (aço carbono, cobre e aço liga). O resultado obtido pode ser visto na figura 2.25 abaixo:

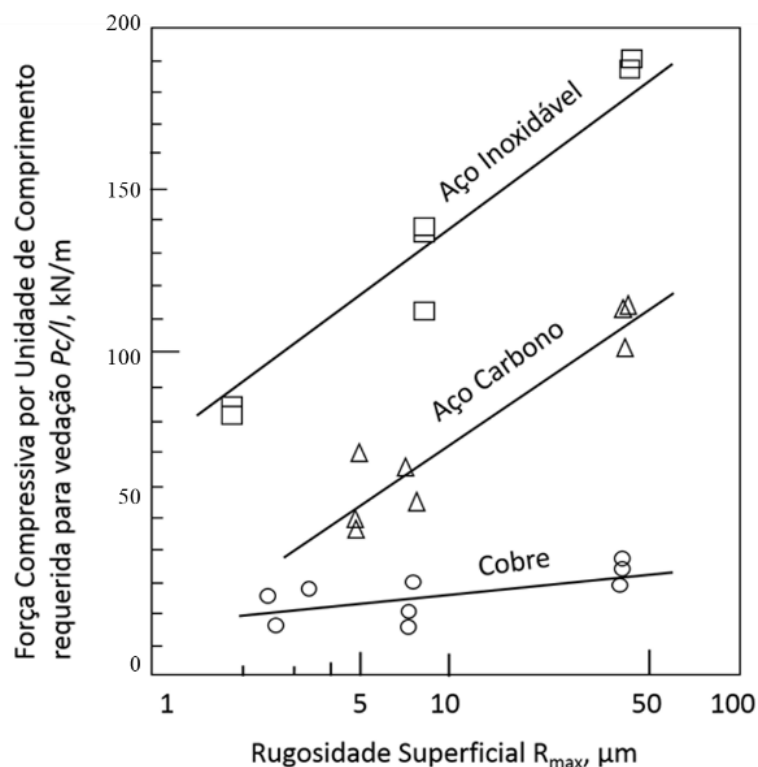


Figura 2.25: Mapeamento da carga de vedação pela rugosidade superficial para diversos contra corpos de prova [25].

2.6 Modelos Para o Escoamento

Uma questão importante em todos os trabalhos avaliados é a maneira como o escoamento é abordado. As premissas são, frequentemente, as mesmas. Escoamentos incompressíveis, de baixa velocidade, com propriedades constantes e desconsiderando efeitos de inércia e acelerações. Também são utilizadas condições de não escorregamento nas paredes, juntamente com desconsideração de deformações nos sólidos oriundos da própria pressão do fluido.

A participação dos elementos topográficos da superfície afeta a construção da geometria final do volume pelo qual o fluido estará escoando. A forma como se dá a interação entre as superfícies pode criar diferentes estruturas de espaços vazios e suas conexões, afetando, portanto, o caminho a ser percorrido e as perdas de carga impostas ao escoamento.

Devido à complexidade que existe na modelagem deste ambiente, é conveniente efetuar simplificações desta estrutura para outras equivalentes e de solução conhecida. As

soluções propostas por [21] e [24] foram baseadas na Lei de Darcy para escoamento em meios porosos, tendo o fator K (permeabilidade) absorvido a parte que cabe ao problema geométrico da rede de poros. Conforme mostrado na seção 2.4, este fator é dado por:

$$K = \frac{1}{L_x} \frac{1}{L_y} \frac{1}{12} \int_{\Omega} h^3 \frac{\partial p}{\partial x} dx dy, \quad (7)$$

A variável h na equação acima contém as informações sobre a distância de separação, a rugosidade média, as deformações e o deslocamento do par. Integrando sobre todo o domínio, obtém-se o parâmetro que representa a permeabilidade da estrutura formada na interface das superfícies. É possível notar que não há dureza ou carga computadas explicitamente nas equações.

Já o modelo de Marie e Lasseux [24], que também serviu de base para o trabalho acima descrito, buscou encontrar os valores de K experimentalmente. Os resultados mostraram que esta permeabilidade depende da carga aparente de contato na forma de uma lei de potência. Para os experimentos conduzidos em altas pressões de contato, duas relações foram encontradas e tem a forma:

$$K = 4,1 \times 10^{10} P_{ca}^{-6,38}, \text{ e} \quad (9)$$

$$K = 3,1 \times 10^{11} P_{ca}^{-6,71}, \quad (10)$$

Neste caso as relações topográficas foram desconsideradas, sendo obtidas de forma indireta em função da carga aplicada e do vazamento medido, representados unicamente pela permeabilidade.

No trabalho de PERSSON [18], a equação para a taxa de vazamento é dada por:

$$\dot{Q} = \frac{L_y}{L_x} \frac{\alpha u^3(\zeta)}{12\eta} \Delta P, \quad (11)$$

Os parâmetros descritivos da superfície estão embutidos na variável u . Como o trabalho utiliza superfícies geradas numericamente, a equação para a separação depende da densidade espectral de potência da rugosidade medida, dada por:

$$C(q) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \langle h_1(x) h_1(0) \rangle e^{-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{x}} d^2 x, \quad (12)$$

Neste caso, nota-se que a equação (11) para a taxa de vazamento se assemelha às

demais propostas apresentadas. A complexidade do modelo está na maneira de se obter a separação entre superfícies em cada ponto do domínio por meio da frequência espacial das entidades topográficas e da pressão efetiva aplicada sobre a interface.

Vê-se que as soluções apresentadas, em geral, se aproximam da solução para o escoamento laminar entre placas planas paralelas infinitas estacionárias [26]. Esta simplificação tem sido verificada experimentalmente nestes trabalhos [18], [21], [24] e [27] para diferentes configurações experimentais ou numéricas. Diferem entre si por constantes e pelo método elaborado para obtenção da distribuição da separação, com exceção para [24], que obteve o fator experimentalmente.

2.7 Vedação de Gases por Barreira Metálica

Para sistemas de altas pressões e altas temperaturas, a vedação com elementos poliméricos ou elastoméricos pode apresentar restrições. Desta forma, o emprego de sistemas com interface metálica demonstra ser uma alternativa viável e apresenta variações que dependem da aplicação. No caso de sistemas estáticos, onde não é previsto desfazer a união dos elementos, podem requerer a deformação plástica de pelo menos uma das superfícies, geralmente a que pode ser reposta em caso de necessidade. É o caso dos anéis metálicos.

Os sistemas fechados por flanges e estojos comumente fazem uso de juntas metálicas (“*Ring Type Joint*” ou apenas RTJ) e possuem todos os parâmetros definidos por norma. Estes parâmetros vão desde as dimensões dos flanges, anéis, estojos e porcas até o cálculo das forças e ordem de aperto dos elementos de fixação. Materiais para cada tipo de aplicação, limitações fabris e até mesmo o grau de acabamento superficial são prescritos devido à larga utilização na indústria.

Como exemplo, é possível citar as normas ASME B16.5 [28], que versa sobre os padrões de flanges e seus acessórios, ASME B16.20 [29], que aborda os elementos de vedação metálicos para flanges de tubulações e a API 6A [30], que trata de equipamentos para cabeça de poço (elemento que faz a interface entre as regiões subterrânea e de superfície de um poço de petróleo) e árvores de natal terrestres (equipamento de segurança composto por válvulas que controla o escoamento em poços de petróleo terrestres, instalado sobre a cabeça de poço). Em todas é possível encontrar requisitos e metodologias para seleção e aplicação de flanges padronizados e juntas metálicas.

Por outro lado, sistemas de vedação que atuam de forma cíclica possuem pouca ou nenhuma literatura de projeto. É o caso das válvulas. Válvulas são elementos de contenção de pressão, bloqueio e controle de fluxo em diversos sistemas e processos. Os parâmetros do projeto mecânico são, tipicamente, confidenciais, constituindo o segredo industrial que diferencia os fabricantes em cada nicho de mercado.

Os requisitos atendem uma variedade de condições de operação, inclusive ligados às normas de tubulações e processos. É o caso dos requisitos de materiais devido à natureza do fluido em serviço ou das classes de pressão e temperatura. Para que possam ser empregados nas aplicações, os sistemas de vedação acabam tendo que respeitar a padronização de condições operacionais já existente para os demais elementos das linhas de processo. Seguem abaixo exemplos de padrões normativos:

Tabela 2: Classes de operação de equipamentos pela norma API 6A [30].

Classes de Pressão (MPa)	Classes de Temperatura (°C)	Classes de Material
13,8	-60 a +82	AA - Aços Carbono e baixa liga
20,7	-46 a +82	BB - Aços Carbono e baixa liga + Inoxidável
34,5	-46 a +60	CC - Inoxidável
69	-29 a +82	DD - Aços Carbono e baixa liga *
103,5	-18 a +60	EE - Aços Carbono e baixa liga + Inoxidável*
138	-18 a +82	FF - Inoxidável*
	-18 a +121	HH - Ligas Resistentes à Corrosão
	+2 a +121	
* De acordo com norma específica ISO 15156		

Tabela 3: Classes pressão-temperatura de flanges pela norma ASME B16.5 [28].

Classes de Pressão-Temperatura	150	300	400	600	900	1500	2500
Máxima Pressão de Trabalho (bar)*	19,6	51,1	68,1	102,1	153,2	255,3	425,5
*Para a faixa de temperatura de -29 a 38°C e materiais do grupo 1.1							

Para diversos cenários são especificados parâmetros de acabamento e dureza das superfícies que serão colocadas em contato. A dureza é especificada em função da forma como a vedação ocorre. O elemento mais barato e fácil de ser substituído é o anel e, portanto, é especificado com menor dureza. É ele quem deverá se deformar para acomodar material nos espaços vazios deixados pela interface gerada no contato. Os canais de assentamento do anel, usinados nos flanges, podem ou não receber deposição

de material nobre e, em geral, tem elevada dureza superficial, aumentando a sua durabilidade.

Tabela 4: Dureza máxima de anéis metálicos [29].

Material	Dureza Máxima HRB
Ferro fundido doce	56
Aço doce	68
Aço F5	72
AISI 410	86
AISI 304	83
AISI 316	83
AISI 347	83

A rugosidade das áreas de contato metálico também é especificada por estas normas. Para os flanges e anéis metálicos, a rugosidade Ra da área de vedação é limitada em $3,2\text{ }\mu\text{m}$ e $1,6\text{ }\mu\text{m}$ respectivamente, pela ASME B16.5. Já a ASME B16.20 possui um tipo de anel cuja rugosidade Ra máxima deve ser de $0,8\text{ }\mu\text{m}$. Por fim, o canal do anel de vedação nos flanges normatizados pela API 6A possui um limite de rugosidade de $6,3\text{ }\mu\text{m}$. Todos estes valores são apresentados independentemente das classes de pressão e temperatura dos equipamentos.

Existe uma preocupação com os fatores de dureza e rugosidade na especificação de sistemas de vedação baseados em contato metálico. No entanto, nenhuma das normas dá detalhes ou procedimentos de como estes limites são obtidos. Os limites são, então, popularizados como prática da indústria.

Um exemplo de sistema de vedação metálico pode ser visto nas figuras 2.26 e 2.27. Trata-se de um sistema típico de válvulas do tipo gaveta para aplicação submarina. Quando ocorre o alinhamento do furo da gaveta (parte móvel) com o furo das sedes (parte estacionária), forma-se uma passagem plena para o escoamento. A vedação ocorre quando a superfície sólida da gaveta e uma das sedes entram em contato sob carga. A força de fechamento é exercida pelo próprio escoamento à montante da gaveta e a vedação ocorre entre esta e a sede de jusante, devido à liberdade de movimentação no sentido do fluxo.



Figura 2.26: Sede (e) e gaveta (d) de uma válvula submarina. Fonte: Autor.

Este é um mecanismo que possui movimento relativo entre as partes, ou seja, não pode depender de deformações permanentes ou de carga constante de fechamento. Ao contrário, é um sistema projetado para vedar sob diversas condições de pressão (força de fechamento) e com vários ciclos de vida útil. Isto implica, em termos práticos, que as faces em contato possuam elevada resistência ao desgaste, sofram deformações que não comprometam a vedação do conjunto e sejam resistentes aos parâmetros de operação (temperatura e pressão) e ao fluido de processo.

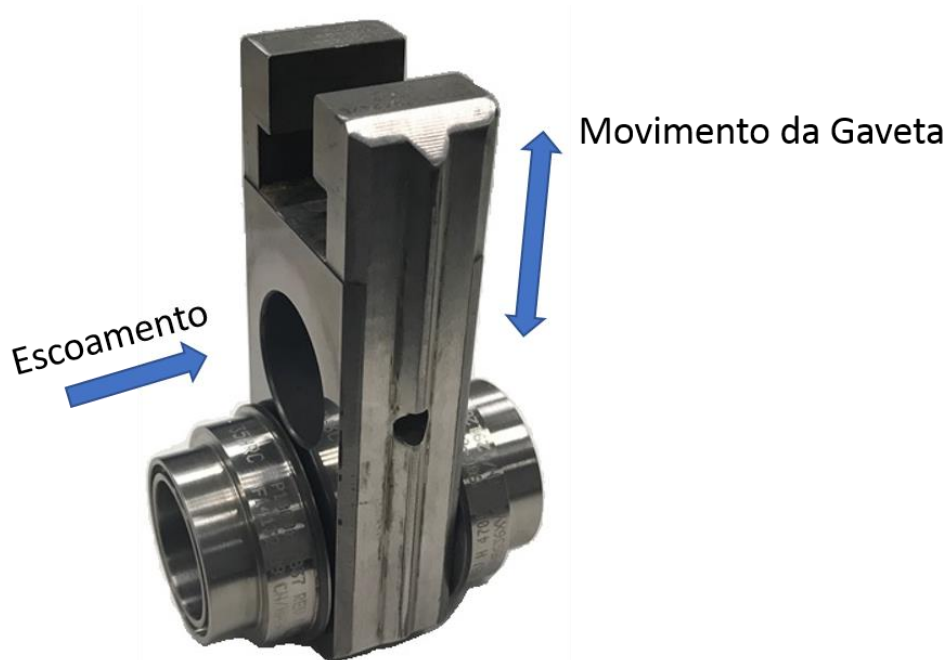


Figura 2.27: Conjunto de sedes e gaveta e indicações de movimento e escoamento.

Fonte: Autor.

No exemplo dado acima, as superfícies recebem aplicação de carboneto de tungstênio (WC), um revestimento cerâmico de alta resistência. Em seguida recebem acabamento por lapidação e tipicamente respeitam tolerância de paralelismo da ordem de 10 μm e rugosidades Ra não superior a 0,2 μm . O rasgo em formato de “T” invertido na parte superior da gaveta permite que ela tenha pequeno deslocamento axial, na direção do escoamento. Tal característica faz com que a vedação ocorra sempre entre a face da gaveta oposta ao fluxo e a sede de jusante.

2.8 Planejamento e Metodologia de Avaliação

Segundo WU e HAMADA [31], a realização de experimentos permite ao investigador descobrir o que acontece com a resposta de um sistema quando os parâmetros de entrada são alterados intencionalmente. Isto permite uma melhor compreensão de como as variáveis de entrada afetam o desempenho de sistemas. A disciplina de Planejamento de Experimentos (de abreviação “DoE” em inglês) é um conjunto de conhecimentos e técnicas que permitem uma otimização do experimento, obtendo uma análise mais eficiente dos dados e o estabelecimento das conexões entre as conclusões e os objetivos originais da investigação.

MONTGOMERY [32] enfatiza que o planejamento é o processo de elaborar o experimento de forma que os dados possam ser analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões válidas e objetivas.

Os experimentos são classificados em 5 tipos principais [31]:

- 1 – Comparação de tratamentos: o objetivo é descobrir o melhor tratamento por meio de múltiplas comparações com os resultados obtidos;
- 2 – Seleção de variáveis: quando o universo de variáveis é muito grande, auxilia na identificação das mais relevantes para a variação da resposta;
- 3 – Busca de superfície de resposta: se o número de variáveis fundamentais for pequeno, pode-se buscar respostas lineares e quadráticas na forma de uma superfície permitindo a análise conjunta dos fatores iniciais;
- 4 – Otimização de sistemas: busca uma estratégia sequencial para encontrar pontos de máximo e mínimo nas respostas;

5 – Robustez do sistema: busca detectar a influência de ruído no desempenho de sistemas permitindo a escolha adequada de fatores de controle do processo.

Os passos fundamentais na elaboração do planejamento de um experimento podem ser vistos no fluxo da figura 2.28 abaixo:

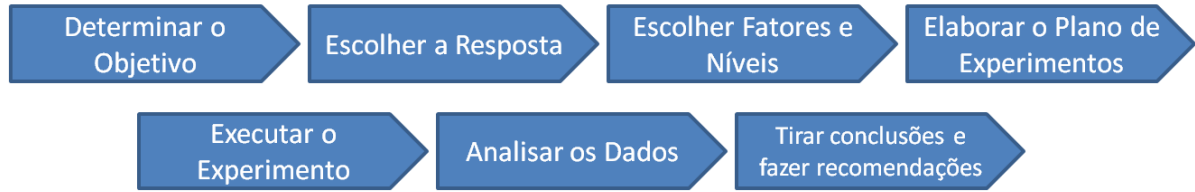


Figura 2.28: Sequência de atividades do Planejamento de Experimentos [31].

Ainda em [32], outro aspecto apontado é a seleção do número de fatores e níveis de cada fator que se deseja investigar. No planejamento fatorial, a combinação destes parâmetros dá o número de réplicas experimentais necessárias no experimento. Por exemplo, uma análise de dez fatores, cada uma com dois níveis, requer 1024 réplicas.

Nas análises de resultados busca-se estabelecer a correlação matemática entre variáveis resposta e preditoras. Para isso, pode-se utilizar uma variedade de ferramentas sendo uma delas a regressão linear. Segundo [31], os modelos de regressão lineares típicos, com variáveis preditoras x_1 a x_p tem a forma da equação abaixo:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_p x_p + \epsilon. \quad (13)$$

Nela, os β 's são os coeficientes de regressão e ϵ é a parte aleatória do modelo, assumida com distribuição normal, média zero e variância σ^2 . Se N observações são coletadas num experimento, então pode-se escrever na forma matricial:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\epsilon}. \quad (14)$$

Já o vetor dos resíduos tem a forma:

$$\mathbf{r} = \mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}}. \quad (15)$$

Impondo a condição de que o vetor de resíduos deve ser perpendicular ao vetor de coeficientes ajustados pelos mínimos quadrados, o problema se transforma num triângulo reto, de forma que se pode utilizar o Teorema de Pitágoras para encontrar a soma dos

quadrados da regressão e dos resíduos. Ou seja, pode-se avaliar a variância do sistema (vetor de resultados) por meio da variância do ajuste de regressão e da variância dos resíduos. Estas relações são combinadas para formar a análise de variância total, resumida na tabela abaixo:

Tabela 5: Tabela de Análise de Variância para o Modelo Linear Geral [31].

Fonte	Graus de Liberdade	Soma de quadrados	Média dos Quadrados
Regressão	p	$\hat{\beta}^T X^T X \hat{\beta} - N\bar{y}^2$	$\frac{\hat{\beta}^T X^T X \hat{\beta} - N\bar{y}^2}{p}$
Resíduo	$N-p-1$	$(y - X\hat{\beta})^T (y - X\hat{\beta})$	$\frac{(y - X\hat{\beta})^T (y - X\hat{\beta})}{N - p - 1}$
Total	$N-1$	$y^T y - N\bar{y}^2$	

Ao efetuar a regressão, deseja-se saber se alguma das variáveis preditoras é explanatória, ou seja, tem capacidade de explicar as variações da resposta. Para isto, pode-se usar um teste de hipótese. Quando nenhuma delas possui esta capacidade, diz-se que a hipótese nula H_0 abaixo é válida:

$$H_0: \beta_1 = \dots = \beta_p = 0, \quad (16)$$

Se esta hipótese for válida, a razão entre a média dos quadrados da regressão e a média dos quadrados dos resíduos possui uma distribuição de Fischer com parâmetros p e $N-p-1$. Este número é chamado de ‘valor F calculado’, obtido nas tabelas da referida distribuição. O valor absoluto da razão entre as médias dos quadrados é chamado de ‘valor F observado’. Para determinar então se a hipótese H_0 é aceita ou não, encontra-se a probabilidade de que o valor F calculado seja maior que o valor F observado. Esta probabilidade é chamada de valor- p e é comparada com um nível de significância α pré-estabelecido, usualmente de 0,05. Este nível de significância delimita a área escura na figura 2.29, uma região de valores com probabilidade baixa de ocorrência. Esta região é chamada de região de rejeição de H_0 . Se o valor- p for inferior a α , significa que a probabilidade de os coeficientes serem iguais é muito pequena. Assim, rejeita-se a

hipótese H_0 e conclui-se que os coeficientes das variáveis preditoras são estatisticamente diferentes.

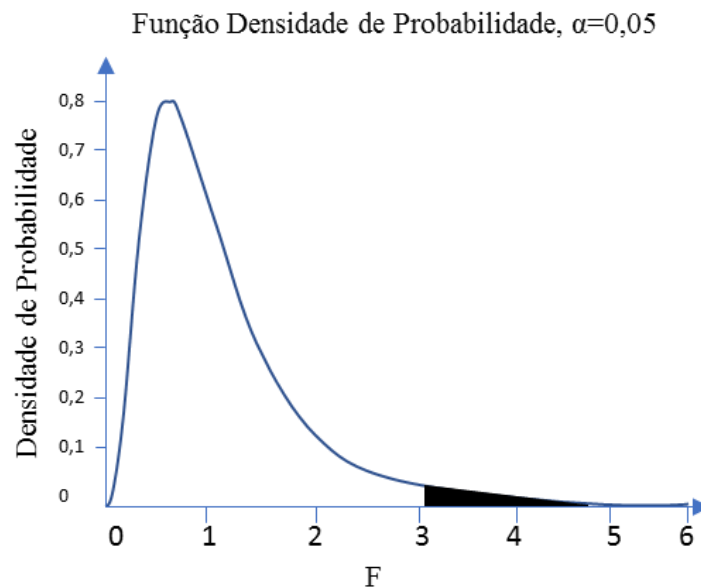


Figura 2.29: Exemplo da distribuição de Fischer e a zona de significância α .

Fonte: Autor.

Uma maneira gráfica para avaliar a influência de diferentes grupos sobre uma variável resposta é o diagrama de caixas. Trata-se de ferramenta utilizada para facilitar a comparação entre variações de dados entre grupos. Os diagramas são construídos a partir dos quartis, valores absolutos dos dados que ocupam as posições que dividem um conjunto em 4 partes iguais. A altura da caixa, também chamada de amplitude interquartil, é delimitada pelos valores do primeiro e do terceiro quartis, como mostrado na figura 2.30. Os limites superior e inferior são calculados considerando uma distância de uma vez e meia a distância interquartil e com a mediana cruzando a caixa horizontalmente. Esta construção já fornece uma indicação visual da dispersão dos dados. Os pontos cujos valores superam os limites são marcados isoladamente.

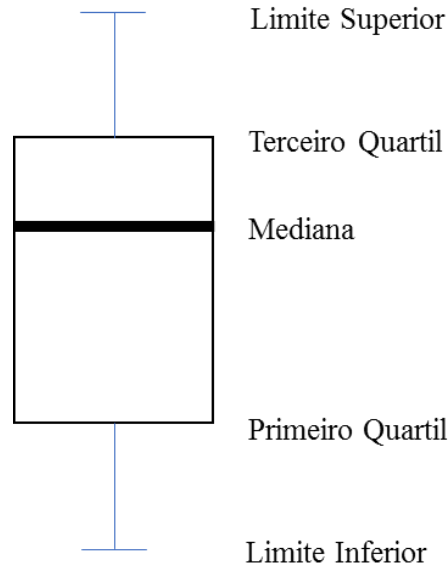


Figura 2.30: Construção do diagrama de caixa. Fonte: Autor.

Diagramas de caixa montados para diferentes grupos e que são muito semelhantes ou com alto grau de sobreposição podem indicar que os dados, na verdade, pertencem à uma mesma população. Por outro lado, diagramas de caixa distintos e cujos limites possuem pouca ou nenhuma sobreposição podem indicar que os grupos pertencem, de fato, a populações diferentes.

Um teste estatístico que pode complementar a análise do diagrama de caixas é o teste da mediana. Ele compara as medianas de amostras de dados e, por meio de um teste de hipótese, verifica a probabilidade de pertencerem à mesma população. Este é um teste não paramétrico, ou seja, não depende da forma como os dados são distribuídos.

A descrição do teste, segundo [33], diz que para cada uma de c populações é extraída uma amostra n_i aleatória. A mediana das amostras combinadas fornece uma mediana de referência. Para cada amostra n_i , são tabelados os números a de observações que excedem a mediana de referência, O_{1i} , e o número b de observações iguais ou menores que a mediana de referência, O_{2i} , tal que $a+b=N$, o número total de observações. Como premissa, se todas as populações tiverem a mesma mediana, todas tem a mesma probabilidade p de exceder a mediana de referência. Fazendo $O_{2i} = n_i - O_{1i}$, o parâmetro estatístico T do teste é:

$$T = \frac{N^2}{ab} \sum_{i=1}^c \frac{(O_{1i} - \frac{n_i a}{N})^2}{n_i}. \quad (17)$$

São formuladas, então, as hipóteses nula e alternativa, conforme abaixo:

H_0 : Todas as populações c possuem a mesma mediana;

H_1 : Pelo menos duas populações possuem diferentes medianas.

De maneira semelhante à ANOVA, adota-se um valor de referência, comumente sendo a significância $\alpha = 95\%$. Para valores de T calculados acima de $\chi_{(1-\alpha)}$ (o valor de chi quadrado tabelado para as condições do problema), a hipótese nula deve ser rejeitada. O valor-p aproximado é a probabilidade de uma variável aleatória chi-quadrada exceder o valor T.

Assim, o teste da mediana pode ser usado de forma complementar à análise gráfica do diagrama de caixas, sempre que houver semelhança na dispersão dos dados.

Quanto aos modelos lineares, para a avaliação da qualidade do ajuste, pode-se utilizar o coeficiente de determinação R^2 , dado por:

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT}, \quad (18)$$

onde:

SQR é a soma dos quadrados dos resíduos;

SQT é a soma total dos quadrados das regressões.

3. O EXPERIMENTO

A investigação experimental precisa reproduzir o fenômeno da forma mais fidedigna possível. Para isto, um par metálico precisa ser colocado em contato sob carga de fechamento e contendo um gás sob pressão. O gás deverá passar pela interface formada pelas rugosidades das duas superfícies utilizadas. Nesta seção são dados detalhes da seleção dos fatores a serem avaliados, a forma construtiva do experimento e o dimensionamento dos seus componentes.

3.1 Seleção de Fatores

O experimento tem como objetivo avaliar como determinados fatores afetam o desempenho de vedação de um dado par metálico. Dentre as diversas variáveis possíveis, foram selecionadas três com grande frequência nos problemas de mecânica de contato e vazamento: rugosidade, carga e dureza.

A rugosidade é frequentemente substituída por uma grandeza que relativiza esta característica de cada elemento do par. Ao efetuar a soma das alturas das asperidades, ocorre a transformação das superfícies de modo que uma possa ser considerada plana perfeita e a outra contenha todo o conjunto de informações topográficas. A grandeza relativa é então chamada de separação [3,4,5,18]. No entanto, esta grandeza não pode ser medida na prática e, considerando que já há a premissa de que uma das superfícies possui rugosidade desprezível, torna-se adequado manter a referência aos parâmetros de superfície na sua forma tradicional.

A carga é outro fator de grande relevância. Diversos trabalhos investigaram as consequências da aplicação de carga entre superfícies em contato. Uma das variáveis de interesse mais comum é a área real de contato e sua relação com a carga aplicada. Existem divergências sobre a linearidade desta relação e sobre os limites de validade de cada modelo [34]. Por outro lado, nas equações que calculam taxas de vazamento (3) e (6), a carga não aparece explicitamente. Ela é utilizada preliminarmente, na obtenção da variável separação e, esta sim, aparece nas fórmulas apresentadas. Por este motivo e, por ser a própria carga dependente da combinação de pressões de fechamento e da cavidade, a avaliação da carga neste estudo será qualitativa.

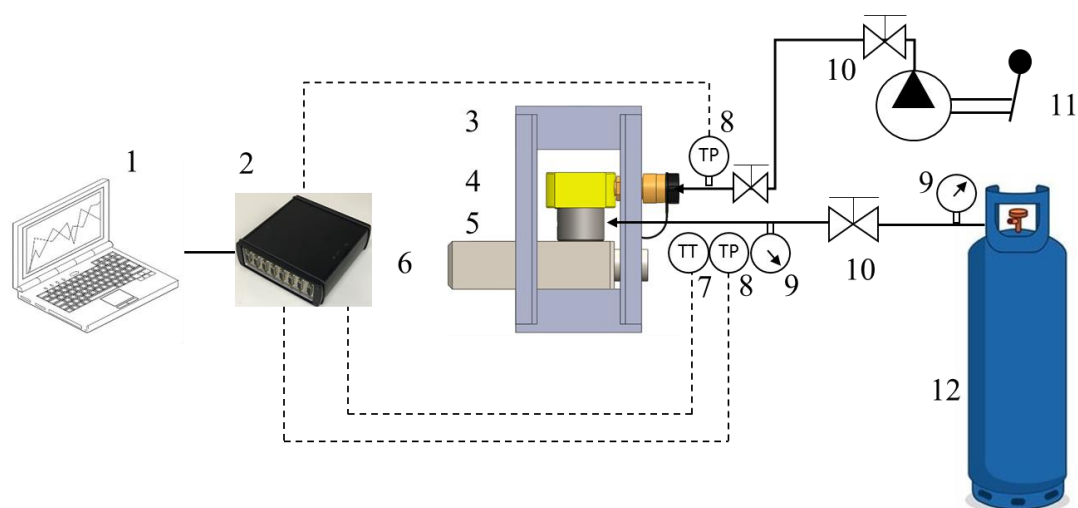
Por fim, a seleção da dureza também vem da sua participação nos modelos de mecânica de contato. A interação entre as superfícies passa obrigatoriamente pelos materiais envolvidos e suas propriedades. Nos modelos de contato estão sempre presentes o módulo elástico e a dureza para avaliar, por exemplo, o regime de deformações (elástico, elasto-plástico, etc.), seu alcance e seus efeitos (e.g., efeito mola). Estas variáveis constam do cálculo do Índice de Plasticidade (1), parâmetro de avaliação proposto por [8] para verificar o regime de deformações do contato mecânico.

Para cada ensaio foi elaborada uma combinação de três níveis de cada fator escolhido: rugosidade, força e dureza. A rugosidade, devido à dificuldade de obtenção de valores únicos que representem todo o universo de corpos de prova, é tratada como variável contínua e, para fins de adaptação à metodologia de avaliação, foi categorizada em três grupos: Grupo 1, com rugosidades Ra na faixa de 0,00 μm até 0,30 μm ; Grupo 2, com valores entre 0,31 μm e 0,60 μm e Grupo 3, com valores acima de 0,61 μm .

3.2 Materiais e Métodos

Para um experimento com três fatores, três níveis e três réplicas, o número mínimo de testes é de $3^3 \times 3$, ou seja, 81 ensaios. Para que cada ensaio seja considerado uma réplica, a superfície dos corpos de prova deve apresentar a mesma condição inicial todas as vezes. Isto significa que ela não deve ser reaproveitada para ensaios subsequentes, sendo utilizada imediatamente após os processos de acabamento e medição.

Para executar a verificação experimental proposta, foi elaborado um arranjo como o mostrado na figura 3.1, que permite montar de forma rápida o par de teste, o sistema de aplicação de força, o sistema de admissão de gás e os demais acessórios, uma vez que este método se baseia na repetição dos ensaios com variação de parâmetros.



- | | |
|------------------------------|---------------------------------|
| 1 – Computador | 7 – Transdutor de Temperatura |
| 2 – Gravador de Dados | 8 – Transdutor de Pressão |
| 3 – Estrutura de Reação | 9 – Manômetro |
| 4 – Atuador Hidráulico | 10 – Válvula de Bloqueio Manual |
| 5 – Corpo de Prova | 11 – Bomba Manual |
| 6 – Superfície de Referência | 12 – Cilindro de Nitrogênio |

Figura 3.1: Arranjo esquemático do experimento. Fonte: Autor.

A literatura revisada evidenciou algumas dificuldades nos estudos de mecânica de contato e modelagem de vazamentos. Dentre elas, destacam-se: escalas de caracterização das superfícies, seleção de parâmetros de amostragem dos métodos de medição, precisão de instrumentos e complexidade dos métodos de detecção de vazamento.

A respeito destas dificuldades, adotou-se os seguintes critérios:

- Para a escala de observação, a mesma será a das ferramentas típicas de medição de superfície, tais como rugosímetros comerciais, ou seja, a escala de medição é da ordem de micrometros;

- Para a seleção dos parâmetros de amostragem, o critério adotado é o recomendado pelo fabricante do perfilômetro, que estabelece os filtros a serem utilizados e o comprimento de amostra a ser medido para cada grupo de rugosidades, conforme Tabela 1;

- A precisão dos instrumentos será aquela que oferecem os transdutores e medidores industriais típicos, tais como os disponíveis no laboratório do CENPES;

- A forma de detecção do vazamento será pela queda de pressão de um volume conhecido, medida com os instrumentos acima mencionados, simulando o grau de precisão que um operador possui na indústria.

O trabalho experimental com gases sob pressão, especialmente em experimentos de vazamento, requer cuidados de segurança para sua viabilidade. Para tanto, será utilizado Nitrogênio Industrial, um gás inerte, não tóxico e de alta disponibilidade comercial. Este gás é comercializado em cilindros industriais com volume de 50 litros e pressão de 18,5 MPa. Além disso, é importante minimizar o volume sob pressão, diminuindo a energia disponível num cenário de falha. A medição da pressão deve ter pelo menos uma redundância e os elementos de vedação devem ter classe de pressão superior à máxima usada para o teste. Por fim, seguindo práticas de normas internacionais [28, 29 e 30], um teste hidrostático deve ser realizado preliminarmente para verificação do comportamento geral do sistema e da resistência dos corpos de prova antes do uso do gás.

A aplicação da força de vedação será feita por meio de um atuador hidráulico conectado a uma bomba de acionamento manual. O sistema possui pistão com diâmetro de 38 mm, curso de 20 mm e pressão máxima de 68,9 MPa. Os equipamentos podem ser vistos na figura 3.2 abaixo:



Figura 3.2: Bomba manual (e) e pistão hidráulico (d). Fonte: Autor.

Para reagir à carga aplicada pelo pistão hidráulico optou-se pela fabricação de uma estrutura de testes do tipo gaiola, constituída por duas mesas reforçadas e colunas de ligação, de dimensões suficientes para abrigar os elementos principais do experimento. As premissas básicas deste componente são: não falhar prematuramente durante a ciclagem, não se deformar de forma a afetar o experimento conduzido e oferecer

segurança ao processo contendo as cargas e sendo construído para minimizar os danos em caso de falha. A figura 3.3 mostra o desenho elaborado para a gaiola.

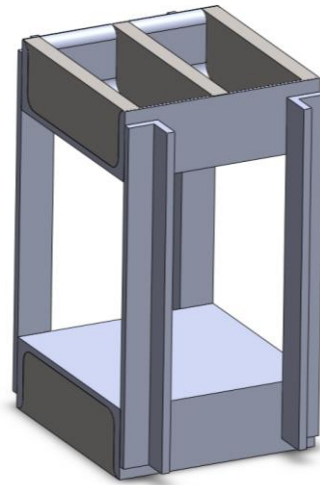


Figura 3.3: Estrutura de reação do experimento. Fonte: Autor.

A exemplo de outro experimento [24], uma das superfícies no ensaio será considerada plana (sem rugosidade) e isenta de defeitos. Para isto, será utilizada a seção sólida de uma das faces de vedação de um obturador de válvula gaveta submarina, conforme figura 3.4 abaixo. Trata-se de componente cuja superfície é acabada por lapidação, revestida com carboneto de tungstênio, rugosidade Ra da ordem de $0,02\ \mu\text{m}$, paralelismo entre faces de $10\ \mu\text{m}$ e dureza de 68 HRC. Além disso, é produzida a partir de um prisma sólido de Inconel, uma liga de níquel resistente à corrosão, com dimensões $108 \times 198 \times 57\ \text{mm}$ e massa em torno de 8 kg.



Figura 3.4: Gaveta de válvula submarina utilizada como superfície de referência. Fonte: Autor.

Para facilitar a variação da dureza optou-se por utilizar três aços diferentes em suas formas comerciais. Foram selecionados os aços AISI 1045, AISI 4130 e AISI 4340. Os dois últimos apresentam durezas muito próximas e foi executado um tratamento de têmpera ao AISI 4340 para que fosse estabelecido o terceiro nível desta variável.

De modo a evitar a necessidade de confeccionar 81 corpos de prova diferentes, sendo 27 para cada nível de dureza, optou-se por fabricar 15 unidades de cada material. Após a utilização, a superfície é novamente submetida à medição perfilométrica e é, então, retrabalhada para obtenção de novo perfil de rugosidade.

Foi escolhida a geometria cilíndrica para os corpos de prova tendo em vista a facilidade de cálculo do vaso de pressão e a usinagem dos mesmos, uma vez que o material bruto pode ser adquirido como barra redonda comercial. A face de contato tem geometria anular, formada pelos diâmetros interno e externo e possui espessura de 10 mm. Esta dimensão atende à largura mínima para utilização da rosca NPT de 3,175 mm de diâmetro nominal, que permitirá a conexão com o sistema de admissão de gás.

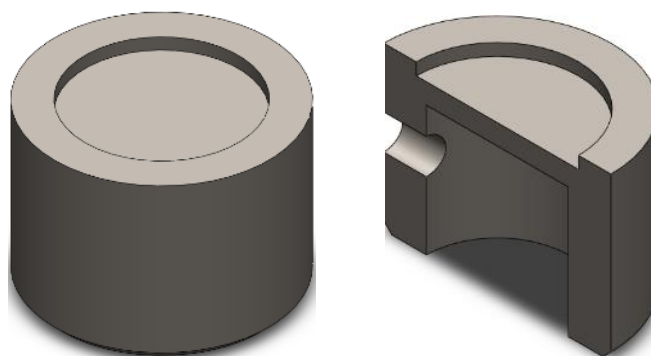


Figura 3.5: Corpo de prova (perspectiva isométrica e isométrica com corte transversal). Fonte: Autor.

Para auxiliar na centralização entre o pistão hidráulico e o corpo de prova, este terá um rebaixo de 3 mm usinado na parte superior, com diâmetro de 40 mm. Esta característica cria um encaixe durante as trocas de corpos de prova e dificulta a projeção dos mesmos caso a pressão hidráulica seja drenada com a cavidade pressurizada, minimizando o risco de acidentes pessoais. O diâmetro externo do corpo de prova é de 55 mm. As figuras 3.5 e 3.6 mostram a forma escolhida para os corpos de prova.

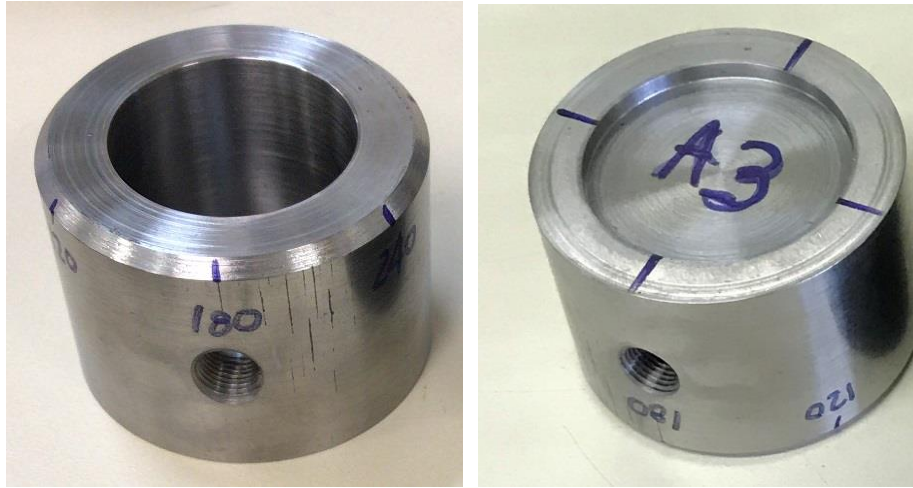


Figura 3.6: Corpos de prova com as marcações para medições. Fonte: Autor.

A superfície de contato dos corpos de prova precisa ser adequadamente preservada para evitar a formação de óxidos oriundos da corrosão atmosférica. Para isto, é aplicada uma camada de vaselina sobre as mesmas e cada corpo de prova é embalado em filme PVC. Para uso nos experimentos, um removedor faz a limpeza bruta da vaselina e a superfície passa então por limpeza com água e sabão neutro, secagem e posterior limpeza fina com álcool isopropílico, estando então em condições de uso para os ensaios. A figura 3.7 mostra os corpos de prova após a etapa da limpeza



Figura 3.7: Corpos de prova armazenados para os ensaios após limpeza fina. Fonte: Autor.

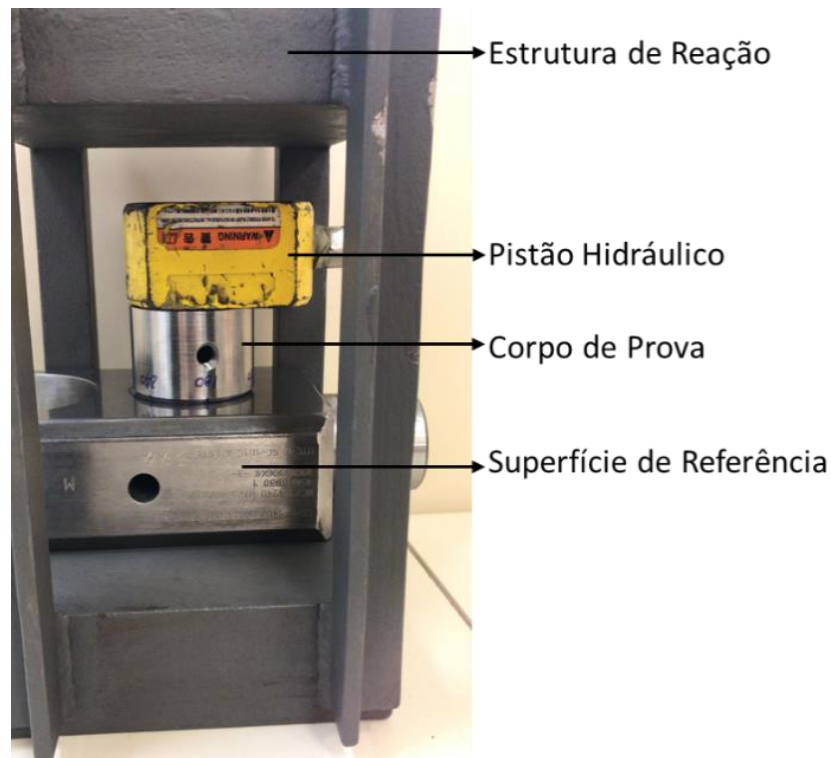


Figura 3.8: Conjunto de teste. Fonte: Autor.

Conforme mostrado na figura 3.8 acima, existe uma folga quando todos os componentes já estão posicionados. Esta folga foi determinada para permitir a montagem e é posteriormente eliminada com a utilização de um espaçador.

A carga aplicada é obtida indiretamente da multiplicação da pressão aplicada ao cilindro pela área do mesmo. Os três níveis de força correspondem a pressões de alimentação hidráulica de 20,69 MPa, 27,58 MPa e 34,5 MPa. No segundo experimento foi utilizada pressão hidráulica única de 62,1 MPa.

Para o primeiro conjunto de ensaios, cada teste consistiu da aplicação preliminar da força, seguida da admissão de gás até que a pressão interna atingisse o valor alvo de 13,79 MPa. Quando este valor é atingido, a admissão de gás é interrompida e o sistema é deixado em repouso (vazando) por um período de 15 minutos. Durante esta etapa, as pressões hidráulica e de gás, a temperatura interna e a deformação da gaiola são gravadas pelo sistema de aquisição de dados.

Para o segundo conjunto de ensaios, o procedimento adotado foi o mesmo, mas a pressão de gás foi limitada em 3,45 MPa. O tempo de gravação do experimento passou a ser de 10 minutos.

A região de interesse é toda a área de contato aparente formada pelos raios externo e interno do corpo de prova, com formato anular, conforme destacado na figura 3.9. Esta área entrará em contato sob carga normal com a superfície de referência. Quando estas superfícies estiverem em contato, pelo modelo adotado, a interface terá a aparência da figura 3.10.

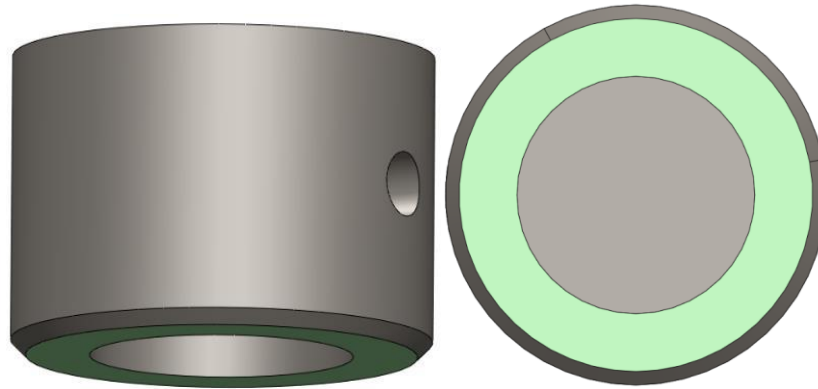


Figura 3.9: Área aparente de contato com formato anular. Fonte: Autor.

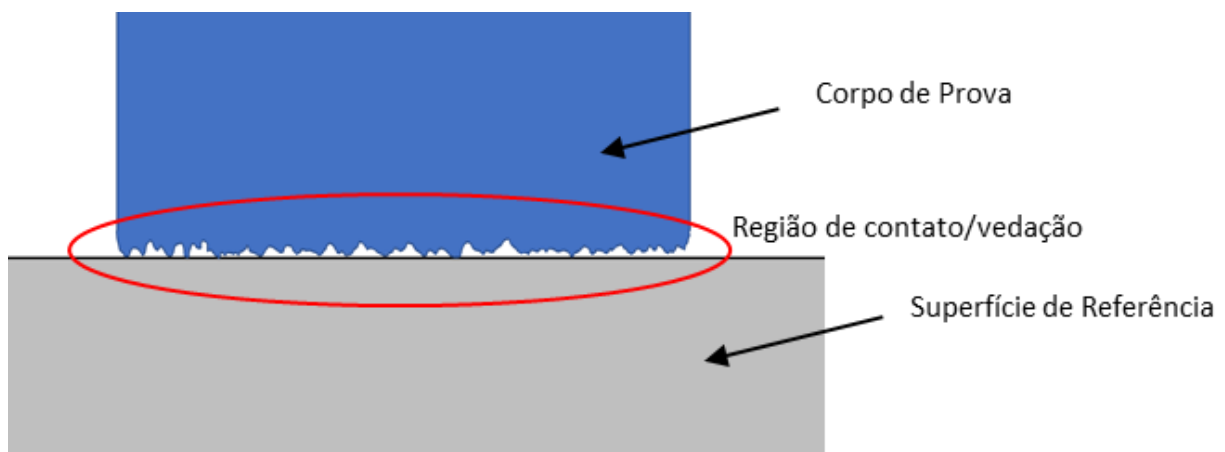


Figura 3.10: Vista em corte da interface de contato. Fonte: Autor.

3.3 Dimensionamento do Experimento,

O cilindro comercial de nitrogênio oferece uma pressão máxima de 18,5 MPa. Para aumentar o rendimento de cada unidade, a pressão máxima do teste foi determinada em 13,7 MPa. Utilizando a menor tensão de escoamento dentre os materiais utilizados, obtida em [35], para dimensionar a espessura mínima do cilindro com um fator de segurança igual a dois, tem-se:

$$\frac{\sigma}{FS} = \frac{PR}{t}, \quad (19)$$

Resolvendo para t , obtém-se que a espessura mínima para suportar a pressão é de 2 mm. Como a espessura mínima requerida para uso da rosca NPT é de 10 mm, a resistência à pressão interna está resolvida para todos os materiais.

O diâmetro interno do corpo de prova passa a ser então de 35 mm. O sistema, quando em teste, fica sujeito à diferença de forças exercidas pelo pistão hidráulico, Fp , e pelo gás pressurizado na cavidade, Fc . Estes valores são obtidos conforme abaixo:

$$Fp = \frac{\pi \cdot 38^2}{4} * P_h, \quad (20)$$

$$Fc = \left(\frac{\pi \cdot 35^2}{4} + \frac{\pi(56^2 - 35^2)}{4} \right) * P_c, \quad (21)$$

A força efetiva de vedação é a diferença entre Fp e Fc . As três pressões hidráulicas escolhidas para fornecer os três níveis de força valem 20,69 MPa, 27,58 MPa e 34,5 MPa. Sabendo que a pressão de teste para a cavidade do corpo será de 13,79 MPa, as três forças efetivas de vedação valem 2,8 kN, 10,6 kN e 18,4 kN. Para o segundo experimento, a força foi de 65,1 kN.

Tendo como referência o contato metálico entre superfícies cujo projeto não prevê deformações permanentes, é comum garantir que o experimento permaneça na zona elástica dos corpos na etapa de projeto. Macroscopicamente, o regime elástico é facilmente garantido ao controlarmos a relação carga e área nominal de contato, mantendo este valor a uma distância segura do limite de escoamento dos materiais.

No entanto, em se tratando de um sistema dependente dos aspectos microscópicos das superfícies, é pertinente avaliar o regime sob o qual se encontra o projeto também nesta escala de observação. Os modelos de mecânica de contato oferecem uma variada gama de formulações para esta verificação, mas foi utilizada aqui aquela que foi a base para os desenvolvimentos posteriores e que já teve sua eficácia comprovada experimentalmente.

O modelo GREENWOOD E WILLIAMSON aponta que o Índice de Plasticidade é o parâmetro capaz de indicar o regime de deformações a que estão sujeitas as asperidades das superfícies em contato. São elementos deste índice a dureza do material

mais macio, o módulo elástico combinado, o desvio padrão da distribuição das alturas das asperidades e o raio médio das asperidades.

A não ser pelo raio das asperidades, todos as demais variáveis já estão disponíveis. Tomando como referência valores da literatura [8], é possível calcular o índice de plasticidade, considerando um raio de asperidades de 150 μm . A tabela abaixo ilustra o caso em que o desvio padrão foi fixado em 0,024:

Tabela 6: Índices de Plasticidade calculados.

Material	Dureza (MPa)	E* (MPa)	Índice de Plasticidade
AISI 1045	1726	108164.6578	0.79
AISI 4130	2403	111060.0521	0.58
AISI 4340	4040	113816.5786	0.36

Outro aspecto importante é garantir que as superfícies sejam produzidas de forma que o vazamento ocorra, pelo menos em grande parte, pelas irregularidades associadas à rugosidade. Em outras palavras, erros de forma e ondulações devem ser minimizados para que não afetem a interface e mascarem o resultado obtido.

Este requisito remete à algumas questões importantes relacionadas à confecção dos corpos de prova. Uma delas é sobre a ordem de grandeza tolerada para estes defeitos. Se os vazamentos devem ocorrer através das rugosidades, que estão na faixa de 0 μm a 1,5 μm , então os desvios de paralelismo entre faces, por exemplo, deveriam ser da mesma ordem.

Mas se esse aspecto é tão importante, por que projetos da indústria toleram desvios de paralelismo da ordem de 10 μm para rugosidades da ordem de 0,2 μm ? Em uma extensa revisão sobre a rigidez de superfícies em contato, BACK *et al* [36] reúnem os resultados de diversas medições de deflexão normal destas superfícies em função de carga, dureza e material. São apontados ainda os principais resultados e fornecidos os métodos para cálculo da deflexão. Um dos gráficos disponíveis pode ser visto na figura 3.9, mostrando que materiais mais macios apresentam maior deflexão normal em função da carga aplicada.

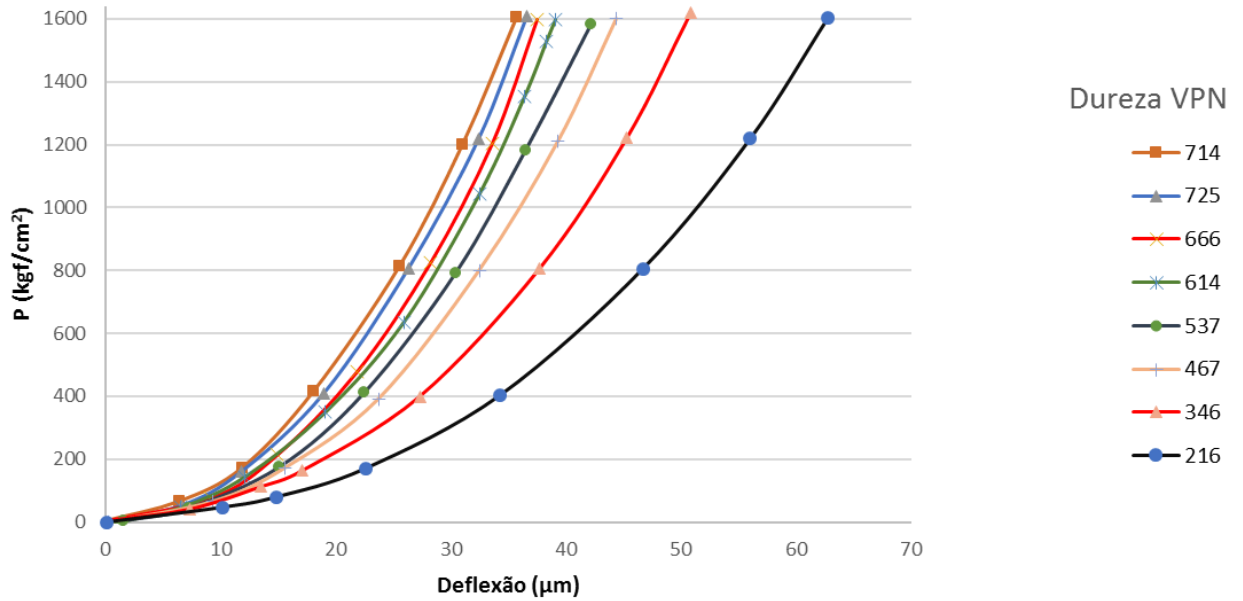


Figura 3.9: Deflexão da superfície em função de carga e dureza, adaptado de [36].

Assim, estando o par submetido à carga suficiente para defletir a interface, sendo esta superior aos desvios de ondulação e paralelismo, pode-se considerar que a premissa de vazamento através dos elementos da rugosidade está atendida.

Para o presente caso, [36] fornece a seguinte equação:

$$\lambda = \hat{C} \bar{P}^m, \quad (22)$$

As referências para obtenção de \hat{C} e m são a máxima distância entre pico e vale (ou R_t) e a rugosidade R_a . Para o nosso caso, estes valores podem chegar a um máximo de $7 \mu\text{m}$ e $1 \mu\text{m}$, respectivamente. Os coeficientes \hat{C} e m obtidos são, portanto, 1,3 e 0,5 [36]. A menor carga efetiva aplicada sobre a região de contato é de $69,34 \text{ kgf/cm}^2$. Substituindo na equação (22), tem-se que λ vale $10,8 \mu\text{m}$.

Desta forma, os corpos de prova passam a ter um requisito de construção para atender à premissa de ordem de grandeza dos desvios. Um limite de desvio de planicidade entre faces de $10 \mu\text{m}$ foi estabelecido e as peças fora desta tolerância seriam retrabalhadas. A verificação é feita por meio de relógio comparador tendo como critério uma diferença máxima entre quatro pontos de medição de $10 \mu\text{m}$, sendo o primeiro ponto tomado sempre como de valor zero e os demais a cada 90 graus. São feitas três medições

para cada corpo e a média destas fornece o valor final. Conforme citado anteriormente, os resultados estão mostrados no Apêndice A.

3.4 Caracterização das Amostras

Os ensaios de dureza foram realizados no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos e Soldagem (LNDC) da COPPE/UFRJ. Foram utilizados testemunhos dos materiais comerciais brutos para as medições. No caso do AISI 4340, como houve execução de têmpera e revenimento, as medições de dureza foram executadas diretamente nos corpos de prova após o ciclo térmico. A figura 3.10 mostra dois testemunhos usinados para a medição e a figura 3.11 mostra a execução do ensaio no laboratório.



Figura 3.10: Testemunhos do material base utilizados para medição de dureza.
Fonte: Autor.



Figura 3.11: Medição de Dureza em durômetro do laboratório LNDC COPPE/UFRJ.

Fonte: Autor.

Tabela 7: Durezas obtidas para os materiais ensaiados.

Material	Dureza (HRC)	Dureza (MPa)
AISI 1045	5	1726
AISI 4130	23	2403
AISI 4340	41	4040

As medições de rugosidade e planicidade foram realizadas no LabMetro COPPE/UFRJ. O perfilômetro utilizado no levantamento dos parâmetros superficiais foi o Talysurf 50, do fabricante Taylor-Hobson. Para as medidas de planicidade, utilizou-se um relógio comparador com base plana. A figura 3.12 mostra os aparelhos utilizados para medir planicidade (e) e rugosidade (d). Já a figura 3.13 apresenta uma vista superior do processo de medição de rugosidade (e) e o padrão utilizado para subdividir a área de contato anular em seis posições igualmente defasadas de 60° (d).

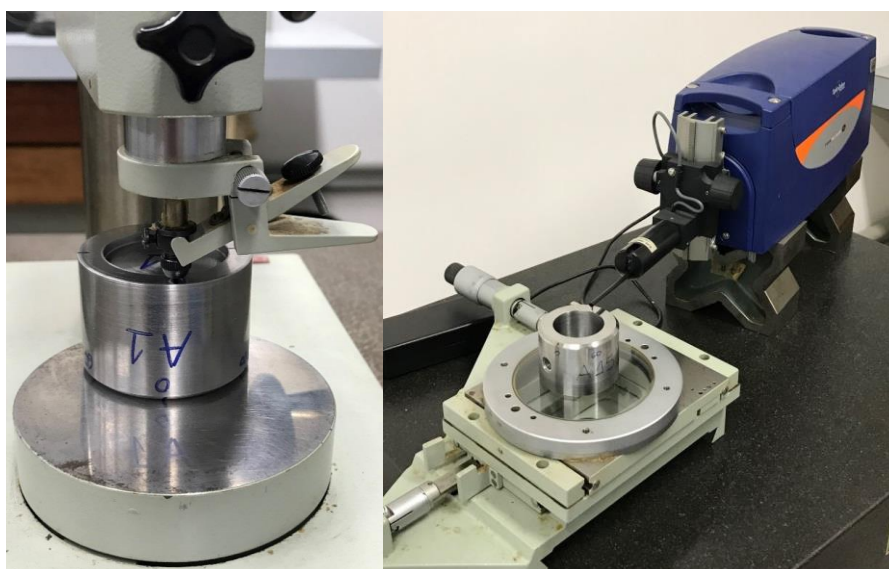


Figura 3.12: Medições de planicidade por relógio comparador (e) e perfilométrica (d) no LabMetro COPPE/UFRJ. Fonte: Autor.

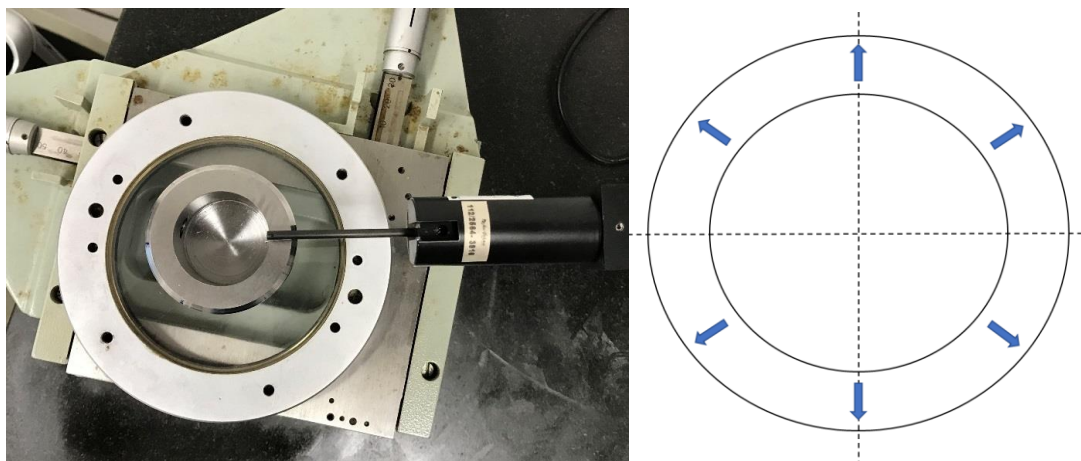


Figura 3.13: Vista superior da medição de perfil (e) e padrão de tomada de medidas (d).

Fonte: Autor.

Os perfis de rugosidade são apresentados no formato bruto, com resultados obtidos da leitura direta das alturas e no formato modificado, com pós processamento e correções pelo *software* do perfilômetro. Exemplos de resultados podem ser vistos nas figuras 3.14 a 3.17.

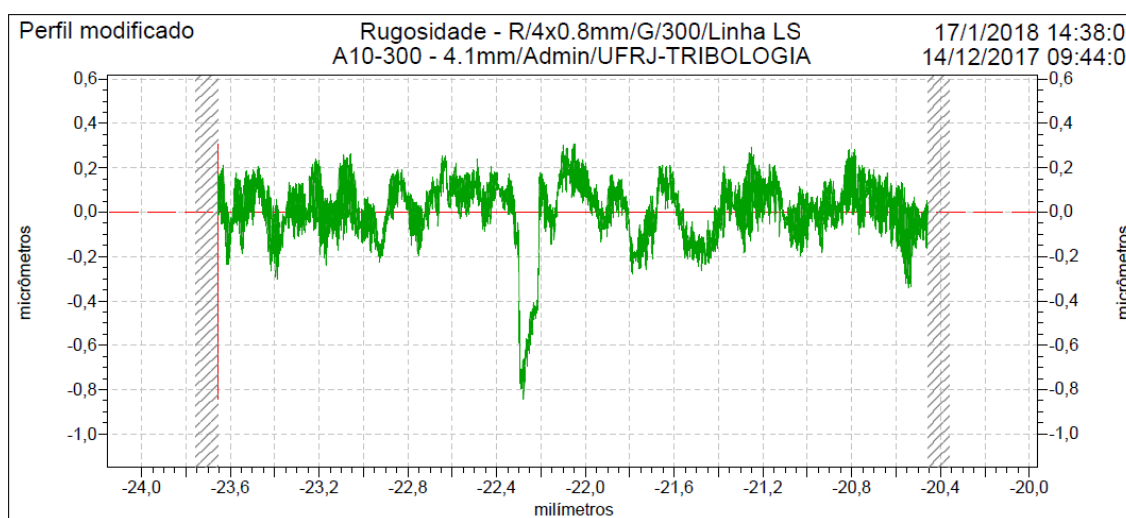


Figura 3.14: Perfil de rugosidade de corpo de prova com R_a de $0,10 \mu\text{m}$. Fonte: Autor.

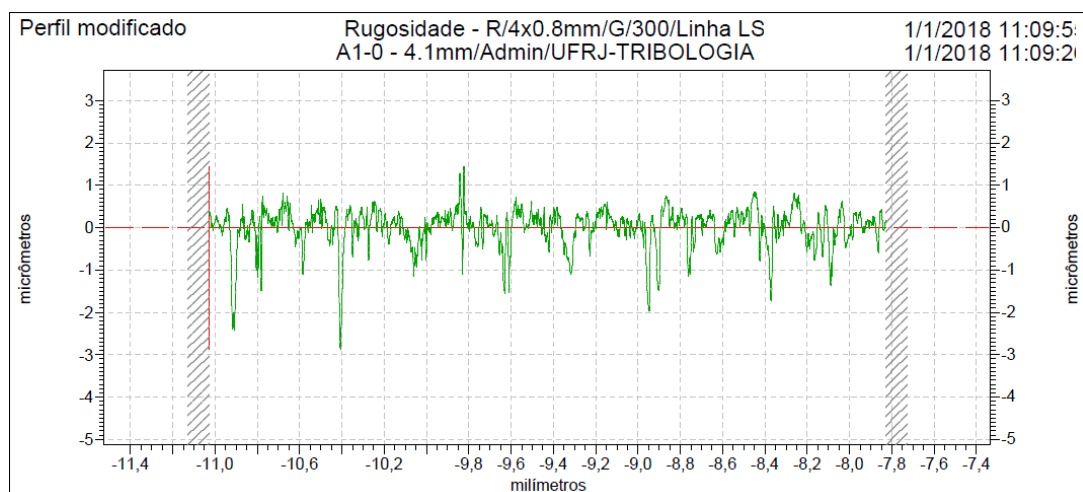


Figura 3.15: Perfil de rugosidade de corpo de prova com Ra de 0,32 μm . Fonte: Autor.

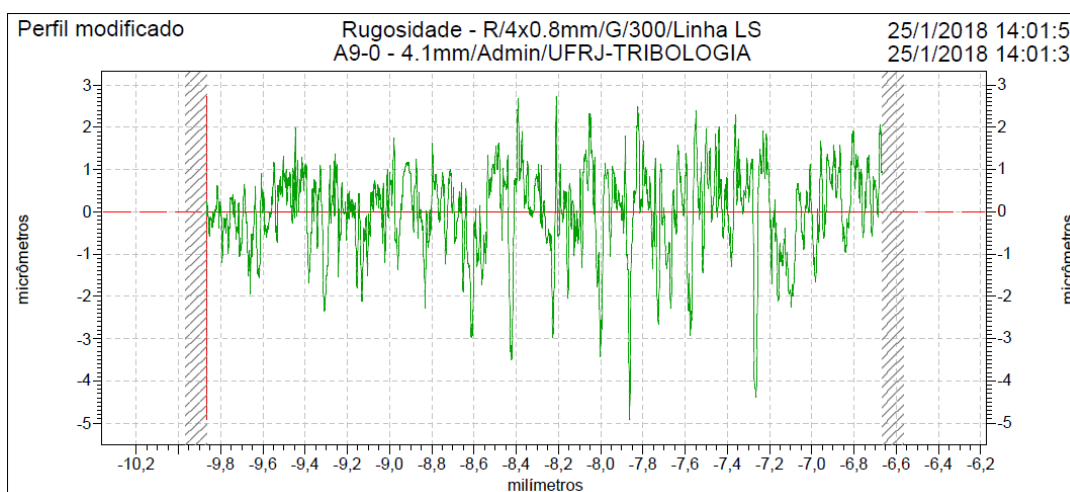


Figura 3.16: Perfil de rugosidade de corpo de prova com Ra de 0,77 μm . Fonte: Autor.

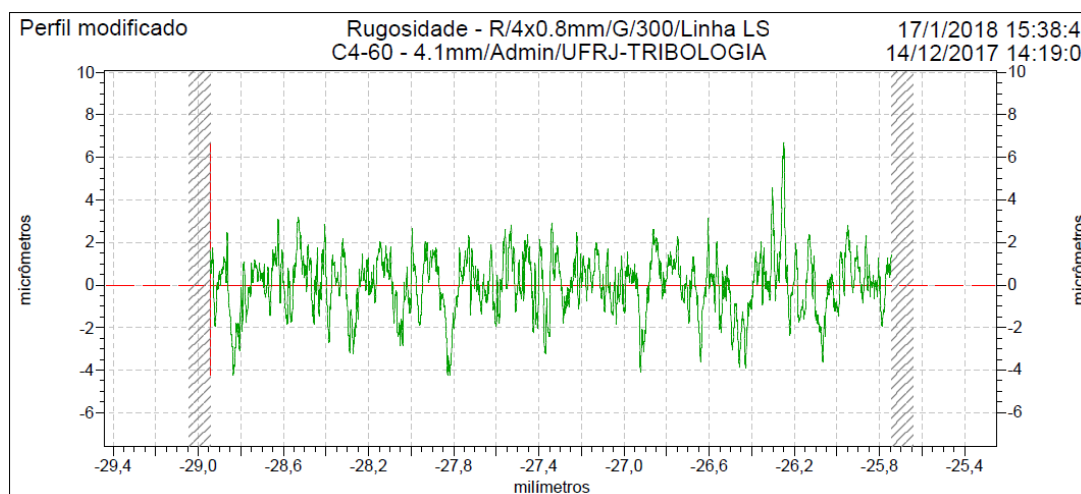


Figura 3.17: Perfil de rugosidade de corpo de prova com Ra de 1,08 μm . Fonte: Autor.

3.5 Aparato de Testes

O aparato de teste consiste, então, dos seguintes elementos: gaiola, corpo de prova, atuador hidráulico e espaçador. A instrumentação presente no experimento é composta por: um transdutor de pressão para medir a pressão hidráulica do atuador, um transdutor de pressão para medir a pressão do gás de teste no volume de controle, um termopar do tipo PT-100 para medir a temperatura do gás no volume de controle, um manômetro para fornecer indicação local da pressão do gás na linha de alimentação e um manômetro para indicar a pressão do gás no cilindro. São elementos de proteção e controle no experimento: uma válvula reguladora mecânica para ajuste da pressão de suprimento no cilindro de gás, uma válvula de bloqueio do tipo esfera flutuante para isolamento da fonte de pressão de gás, uma válvula de bloqueio do tipo esfera flutuante para isolamento da fonte de pressão hidráulica do atuador e uma válvula de bloqueio do tipo agulha para ser a redundância no isolamento da fonte hidráulica.

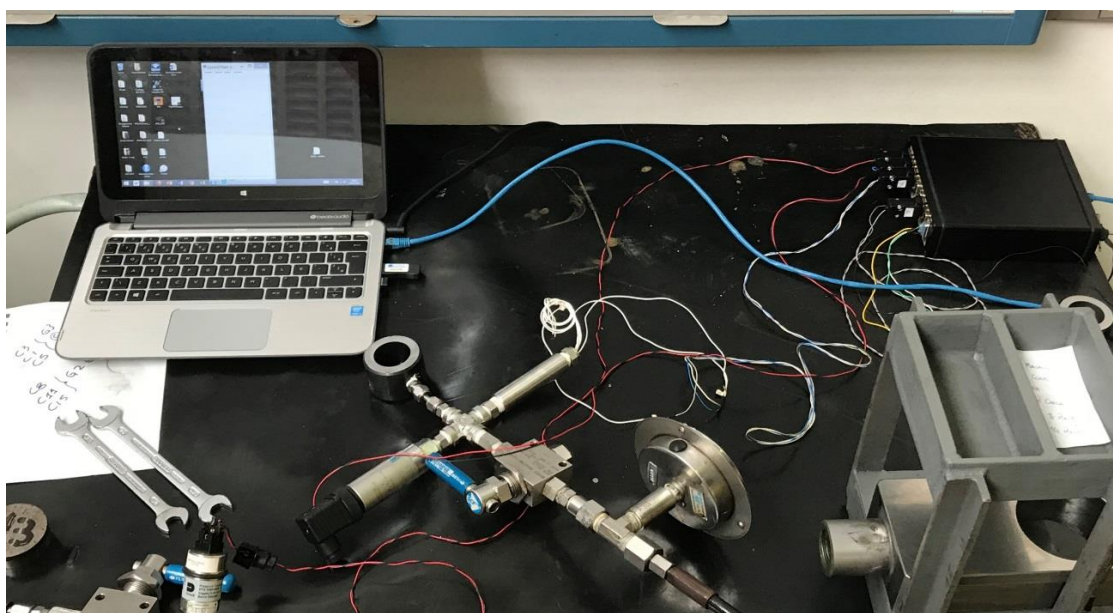


Figura 3.18: Bancada de testes. Fonte: Autor.

A figura 3.15 mostra os componentes do experimento sobre a bancada de testes utilizada no Laboratório Hiperbárico do CENPES. A figura 3.19 detalha a seção principal do aparato que consiste dos elementos sensores, válvula de bloqueio da admissão do gás e corpo de prova. O volume composto por estes componentes gera o volume de controle do experimento.

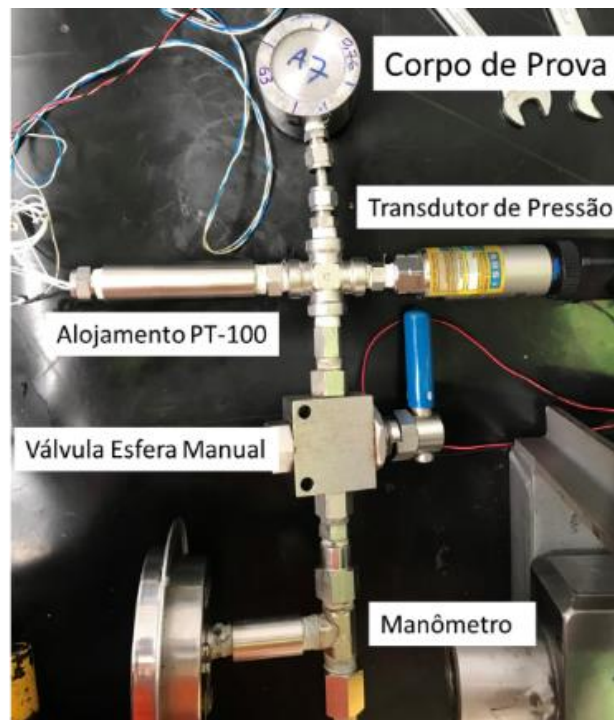


Figura 3.19: Volume de controle. Fonte: Autor.

3.6 Aquisição e Gravação dos Dados

Os parâmetros relevantes deste experimento são as pressões interna do gás na cavidade do corpo de prova e do atuador hidráulico, executando a força de vedação. Como o fluido utilizado é um gás, mediu-se a temperatura para que fosse possível efetuar correções termodinâmicas em caso de necessidade.

As medições destas grandezas foram realizadas por um conjunto de instrumentos composto por:

- 1 manômetro mecânico – faixa de trabalho de 0 a 645 bar;
- 2 transdutores de pressão – faixa de trabalho de 0 a 645 bar;
- 1 sensor de temperatura do tipo PT-100 – faixa de trabalho -200°C a 850°C.

Para registrar os dados de pressão e temperatura foi utilizado um gravador de dados da marca *Lynx*, modelo DLG4000, como o mostrado na figura 3.20. As entradas de sinais analógicos são configuradas em *software* próprio. A variável de saída dos transdutores de pressão é a corrente, variando de 4 mA a 20 mA. Já o PT-100, por se tratar de sensor tipo resistência, fornece variação de resistência.



Figura 3.20: Gravador de dados utilizado, modelo DLG4000. Fonte: Autor.

Além destes sinais principais foram lidos os sinais de dois extensômetros colados sobre uma das colunas da gaiola e a temperatura ambiente. O primeiro lido por canal analógico do gravador de dados e o segundo pelo termômetro embutido no mesmo.

O manômetro mecânico foi utilizado para auxiliar a operação de pressurização do corpo de prova e para sinalização de pressão em caso de falha do computador ou do transdutor de pressão.

No registrador, os dados são gravados em formato proprietário em um cartão de memória. Após a conversão para arquivo do tipo texto, os dados já podem ser lidos por qualquer outro *software* de análise de dados.

3.7 Realização dos Ensaios

Os ensaios foram realizados no Laboratório Hiperbárico do CENPES, Rio de Janeiro, no período de 23 de janeiro de 2018 a 03 de março de 2018. Inicialmente eram previstas 81 medições. Devido à problemas de execução inadequada ou de aquisição de dados, 11 ensaios foram repetidos. Após a avaliação inicial dos resultados, outros 27 testes adicionais foram executados. Foi realizado um total de 119 ensaios que geraram duas tabelas de resultados.

Os corpos de prova foram selecionados para atender aos testes nas combinações necessárias. A tabela 8 mostra a codificação escolhida e as tabelas 9 e 10 abaixo identificam a distribuição em cada teste. Esta identificação ajuda no pós-processamento dos parâmetros de rugosidade.

Tabela 8: Codificação dos corpos de prova.

Código do Corpo de Prova	Valor
A, B ou C	A = 1045, B = 4130 e C = 4340 T&R
G1, G2 ou G3	Faixas de Rugosidade
	G1 – 0,00 a 0,30 μm
	G2 – 0,031 a 0,60 μm
	G3 – $R_a > 0,61 \mu\text{m}$
1...15	Identificador sequencial por material

Tabela 9: Registro dos corpos de prova utilizados no primeiro conjunto de 81 testes.

Força		2.8 kN			10.6 kN			18.4 kN		
Réplica		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Dureza	Rugosidade									
A	G1	7	10	12	2	5	11	2	13	15
	G2	1	2	12	6	11	12	11	11	12
	G3	5	8	9	8	9	10	5	7	10
B	G1	1	8	11	2	6	7	7	8	10
	G2	2	3	5	2	3	4	2	3	4
	G3	12	13	14	5	6	15	1	9	11
C	G1	7	12	14	7	12	14	7	12	14
	G2	5	13	15	2	6	15	2	5	13
	G3	1	3	5	1	4	9	4	8	11

Tabela 10: Registro dos corpos de prova utilizados no segundo conjunto de 27 testes.

Dureza	Rugosidade	Réplicas		
		1	2	3
A	G1	2	11	13
	G2	6	8	12
	G3	5	7	9
B	G1	2	8	10
	G2	4	7	11
	G3	5	12	15
C	G1	5	7	12
	G2	6	14	15
	G3	1	3	8

As rugosidades Ra médias de cada corpo de prova utilizado nos testes podem ser vistas na tabela 11 abaixo. Os valores são obtidos da média aritmética simples das seis medições realizadas em cada corpo.

Tabela 11: Rugosidade Ra média dos corpos de prova do primeiro conjunto de testes.

Força		2.8 kN			10.6 kN			18.4 kN		
Réplica		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Dureza	Rugosidade									
A	G1	0,16	0,16	0,16	0,28	0,14	0,20	0,27	0,16	0,29
	G2	0,31	0,31	0,45	0,53	0,50	0,46	0,48	0,46	0,46
	G3	0,78	0,68	0,75	0,64	0,77	0,71	0,75	0,76	0,69
B	G1	0,3	0,17	0,17	0,3	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15
	G2	0,32	0,33	0,39	0,32	0,38	0,32	0,32	0,3	0,33
	G3	0,67	0,65	0,63	0,62	0,85	0,66	0,91	0,73	0,86
C	G1	0,25	0,16	0,25	0,22	0,16	0,23	0,21	0,17	0,24
	G2	0,54	0,43	0,58	0,46	0,57	0,57	0,47	0,51	0,43
	G3	0,84	0,65	0,93	0,98	0,93	0,63	0,92	0,67	0,66

Tabela 12: Rugosidade Ra média dos corpos de prova do segundo conjunto de testes.

Dureza	Rugosidade	Réplicas		
		1	2	3
A	G1	0.2	0.15	0.2
	G2	0.43	0.57	0.43
	G3	0.7	0.63	0.7
B	G1	0.22	0.15	0.18
	G2	0.34	0.33	0.51
	G3	0.63	0.62	0.61
C	G1	0.15	0.21	0.13
	G2	0.37	0.53	0.43
	G3	0.83	0.82	0.63

A figura 3.21 mostra o aparato de testes sob pressão durante a execução de um dos ensaios.

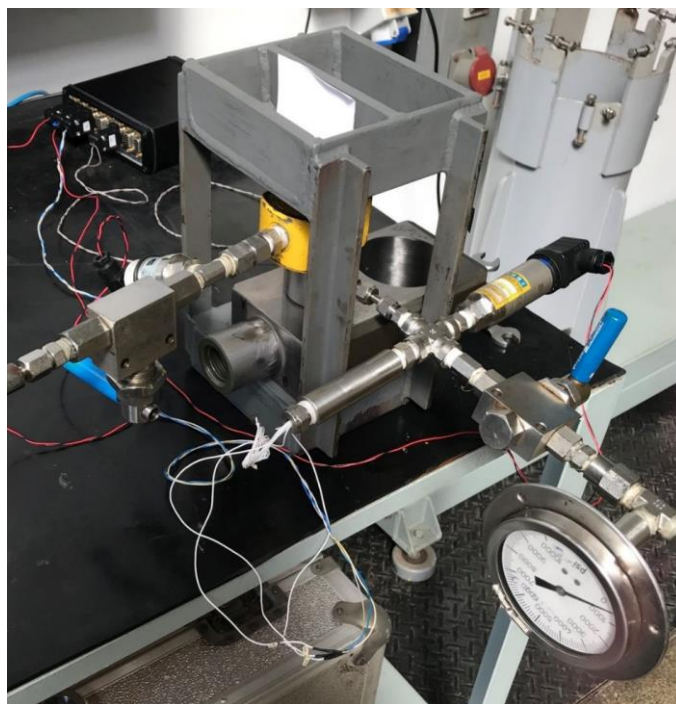


Figura 3.21: Aparato em funcionamento. Fonte: Autor.

Antes de realizar os ensaios, foi feito um teste hidrostático com um dos corpos de prova de maneira a antecipar uma possível falha do sistema quando operado sob pressão. O fluido de teste foi um óleo de silicone e a pressão utilizada foi de 34,5 MPa. A figura 3.22 abaixo mostra o momento em que a carga foi retirada e o óleo vaza pela interface, molhando a superfície da gaveta.



Figura 3.22: Vazamento de óleo após teste hidrostático. Fonte: Autor.

O corpo de prova utilizado no teste hidrostático recebeu a aplicação de um extensômetro para avaliação do nível de deformação axial em função da carga aplicada, conforme mostra a figura 3.23 abaixo:



Figura 3.23: Extensômetro utilizado no teste hidrostático. Fonte: Autor.

A medição mostrou que a deformação máxima atingida pelo corpo de prova foi de 22 microstrains em compressão. Mesmo sabendo que as cargas compressivas estão bem abaixo do limite de elasticidade dos materiais usados, este teste buscou avaliar se haveria deformação residual significativa, a ponto de levar os corpos de prova a um retrabalho antes da próxima utilização, o que não ocorreu.

Os ensaios foram executados seguindo os procedimentos descritos no Apêndice B. Todos os passos foram executados pelo próprio autor, como mostrado na figura 3.24 abaixo. Após a substituição de cada corpo de prova, o mesmo recebia uma camada de vaselina para preservação da superfície até o momento da nova medição no Laboratório de Metrologia. Cada ensaio gerou um arquivo de dados em formato proprietário, posteriormente convertido em arquivo de texto. Os arquivos foram nomeados com a codificação do corpo de prova e do teste executado.



Figura 3.24: Abertura do gás de teste com uso de válvula micrométrica. Fonte: Autor.

4. RESULTADOS

Todos os resultados dos testes foram gravados pelo sistema de aquisição de dados e, posteriormente, convertidos para o formato texto. Este formato dá liberdade para a escolha do *software* de análise.

Para este trabalho, optou-se por elaborar as rotinas para tratamento dos dados no *software* estatístico *R* e de sua interface avançada *R Studio*. A opção por este programa é devida ao fato de ele ter sido concebido para análises de grandes volumes de dados e possuir as principais funções estatísticas previamente embutidas. Dentre estas funções está a análise de variância, metodologia utilizada para avaliar os fatores experimentais selecionados. Outra característica considerada para a escolha é de que existe uma grande variedade de pacotes de funções criadas por usuários disponível de forma gratuita, como foi o caso das funções que executam o teste das medianas.

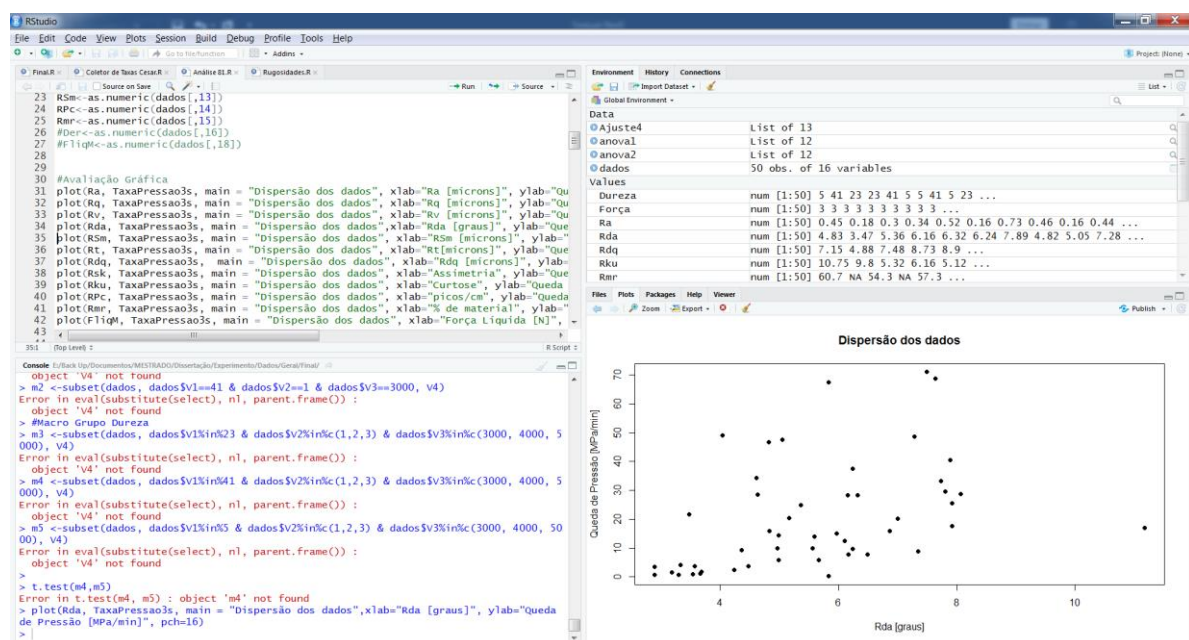


Figura 4.1: Interface do *software R Studio*. Fonte: Autor.

As rotinas elaboradas para manipulação e tratamento dos dados estão transcritas no Apêndice C.

4.1 Avaliação da Força Aplicada

O primeiro conjunto de resultados é fruto de 81 ensaios válidos, conforme planejamento apresentado na seção 3. Os gráficos dos experimentos apresentam a taxa de queda de pressão em função do período de observação, definido como 10 minutos. O período de monitoramento tem início quando a pressão na cavidade do corpo de prova atinge o valor de 13,8 MPa. Alguns exemplos são mostrados nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4 abaixo:

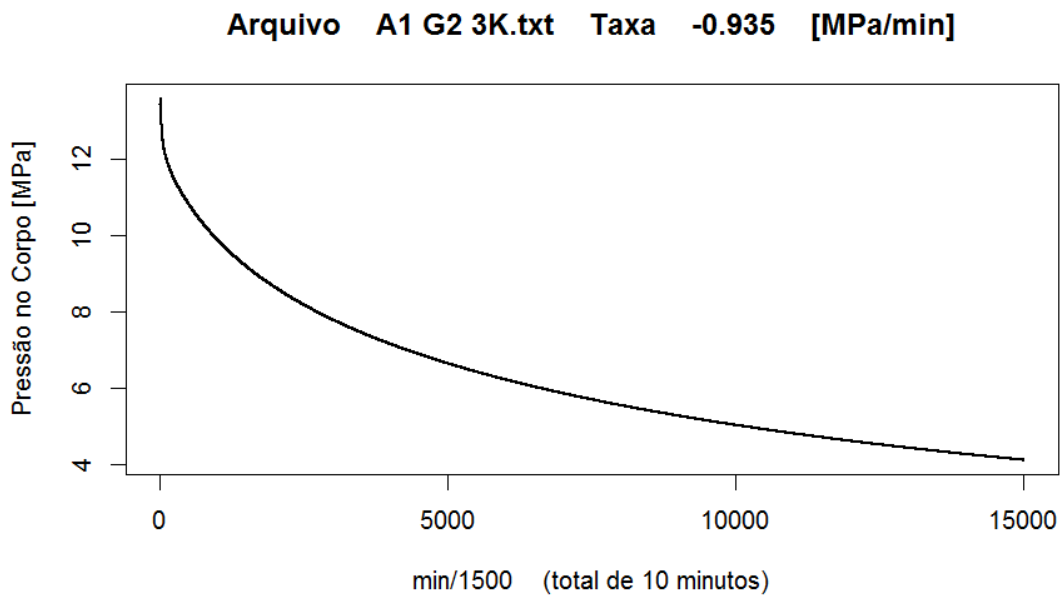


Figura 4.2: Resultado para Grupo 2, Dureza 5 e Pressão Inicial de 20,69 MPa.

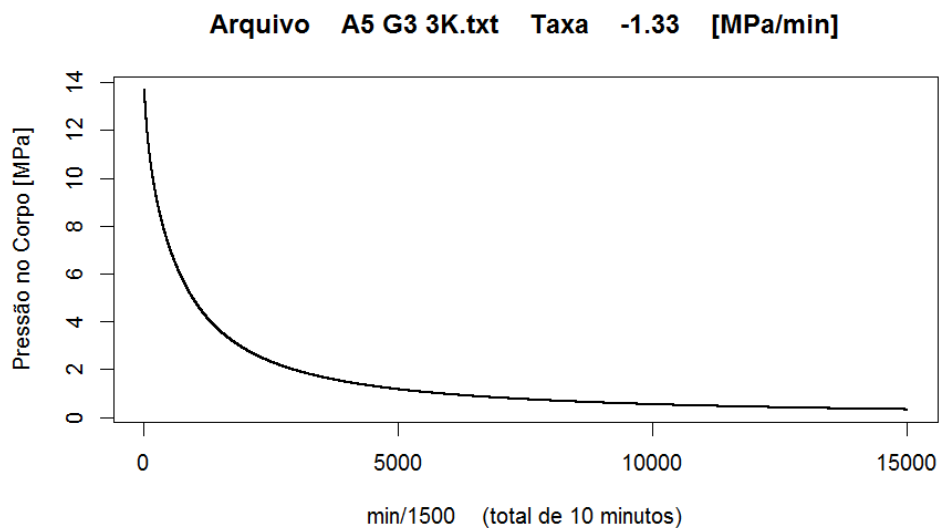


Figura 4.3: Resultado para Grupo 3, Dureza 5 e Pressão Inicial de 20,69 MPa.

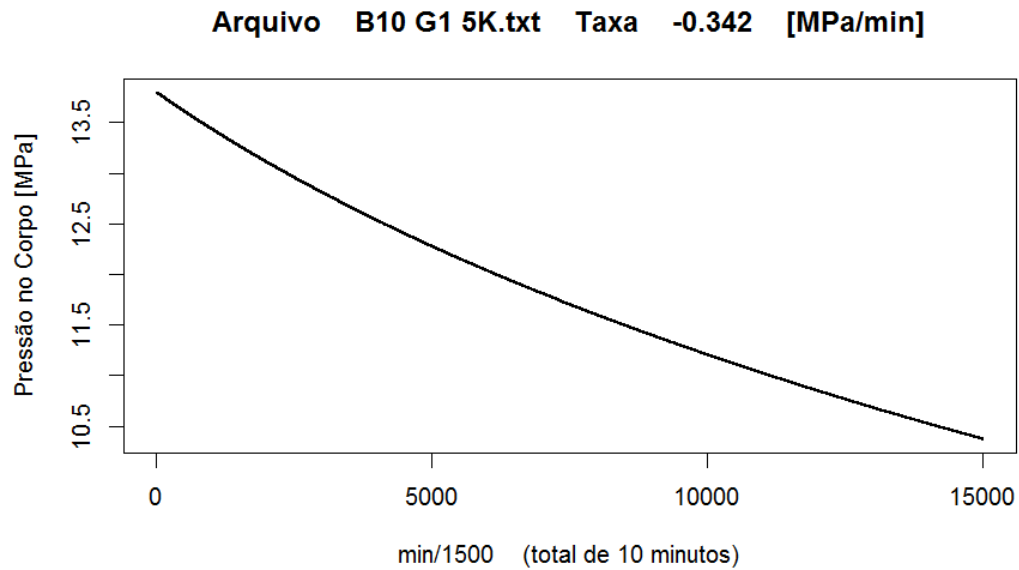


Figura 4.4: Resultado para Grupo 1, Dureza 23 e Pressão Inicial de 34,48 MPa.

É possível notar pelos exemplos que para o mesmo período de observação, há diferentes valores finais de pressão na cavidade e diferentes taxas de modificação da variação de pressão no corpo. A pressão cai mais rapidamente para alguns casos do que para outros.

A variação na forma como a pressão na cavidade decresce é a confirmação de que as diferentes configurações produzem efeito sobre o escoamento pela interface. No entanto, não tendo sido medida a taxa de vazamento, a queda de pressão é avaliada como a diferença entre os valores final e inicial da pressão dividida pelo tempo de observação.

Neste experimento, a força efetiva de vedação, dada pela diferença entre a força de fechamento executada pelo atuador hidráulico e a força de expulsão, exercida pelo gás no corpo, varia ao longo do experimento. Os níveis de força diferem apenas nos instantes iniciais, quando a força efetiva é próxima da nominal estipulada. Para fazer esta avaliação, o tempo de observação deve tender a zero. Em termos práticos, o período de observação utilizado para avaliar este fator foi reduzido a 3 segundos. Com o subconjunto de dados gerado, pode-se observar a dispersão gerada por meio de um diagrama de caixa:

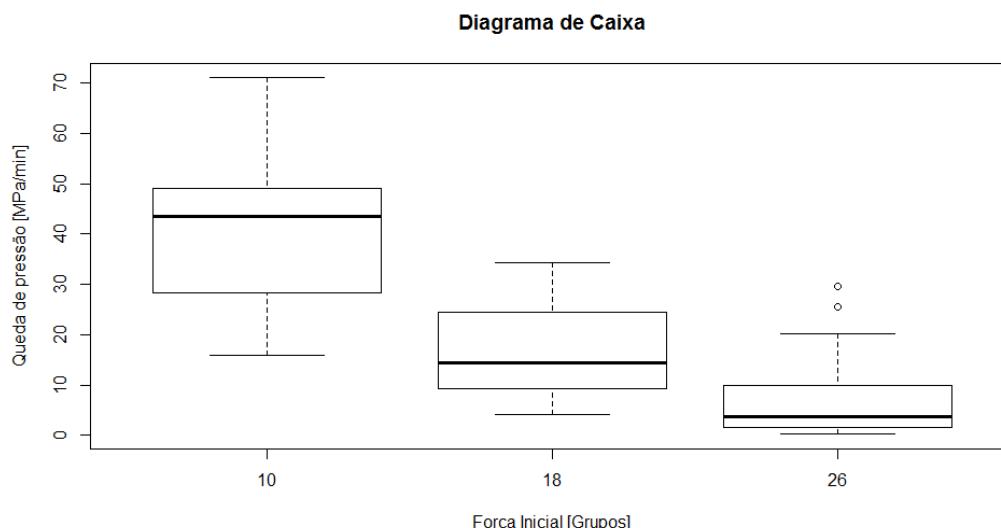


Figura 4.5: Diagrama de caixa para a variável força inicial. Fonte: Autor.

No diagrama da figura 4.5 pode-se notar uma diferença entre as caixas formadas pelos dados de cada grupo de força. A mediana da queda de pressão cai com o aumento da força inicial aplicada. Este resultado concorda com a ideia de que um aumento na força de contato leva a uma diminuição dos espaços interfaciais por ocasião da acomodação das asperidades.

É possível notar, também, que a dispersão de cada nível de força diminui quando esta aumenta. Isto se deve ao fato de que o menor valor de força inicial é muito próximo da força de abertura promovida pelo gás. Nesta condição, a interface permite uma variação da distância de separação maior, fazendo com que a força líquida apresente flutuações durante o experimento. Quando a força de fechamento vai se tornando significativamente maior que a de abertura, o escoamento por ela tende a ficar estabilizado, assim como a distância interfacial, resultando em menor dispersão, como pode ser visto no diagrama de caixa do nível 26 kN da figura 4.5.

Conforme citado na seção 2.8, um teste complementar para validar a hipótese de que a força inicial está afetando a taxa de queda de pressão é o teste da mediana. A vantagem para sua aplicação aqui é que ela não depende da forma como se dá a distribuição da variável. O teste aplicado tem como fundamento o teste de *chi-quadrado*. Executando o teste, tem-se o seguinte resultado:

Tabela 13: Resultado do teste da mediana para o fator força.

Nível de Força Inicial	Mediana	1º Quartil	3º Quartil	População
2.8	43.6	28.2000	48.9000	a
10.6	14.4	9.3000	24.5000	b
18.4	3.8	1.6000	10.0000	c

A informação da tabela de que os níveis de força pertencem a grupos diferentes confirma que os resultados obtidos para a queda de pressão não são devidos a erros experimentais ou eventos aleatórios, mas sim fruto da variação direta da força inicial utilizada.

4.2 Avaliação dos Fatores Dureza e Rugosidade

Buscando dar mais protagonismo aos parâmetros de caracterização das superfícies, um segundo experimento foi planejado. Desta vez, a carga de fechamento seria suficientemente maior que a pressão interna de modo que as flutuações da força líquida pudessem ser desprezadas, tornando-a praticamente constante. O comportamento da taxa deve ser observado em função apenas dos parâmetros de superfície e material, visando descobrir como se dá a contribuição de cada um. Excluindo o fator força, já avaliado no primeiro conjunto de testes, o novo planejamento fatorial passa a ter dois fatores com três níveis e três réplicas, requerendo um mínimo de 27 ensaios. Os resultados obtidos podem ser vistos na tabela 14 abaixo:

Tabela 14: Resultados e parâmetros de controle consolidados.

CP	Dureza (HRC)	Grupo Rugosidade	Ra (μm)	Taxa (MPa/min)
A11	5	1	0.15	0.004
A12	5	2	0.43	0.087
A13	5	1	0.2	0.010
A2	5	1	0.2	0.000
A5	5	3	0.7	0.207
A6	5	2	0.43	0.054
A7	5	3	0.63	0.153
A8	5	2	0.57	0.172
A9	5	3	0.7	0.273
B10	23	1	0.18	0.005
B11	23	2	0.51	0.169
B12	23	3	0.62	0.197
B15	23	3	0.61	0.260
B2	23	1	0.22	0.004
B4	23	2	0.34	0.047
B5	23	3	0.63	0.273
B7	23	2	0.33	0.129
B8	23	1	0.15	0.005
C1	41	3	0.83	0.281
C12	41	1	0.13	0.000
C14	41	2	0.53	0.190
C15	41	2	0.43	0.146
C3	41	3	0.82	0.301
C5	41	1	0.15	0.011
C6	41	2	0.37	0.080
C7	41	1	0.21	0.000
C8	41	3	0.63	0.268

A avaliação inicial é feita através do uso do diagrama de caixas para os fatores dureza e rugosidade, tendo o primeiro fornecido o seguinte resultado:

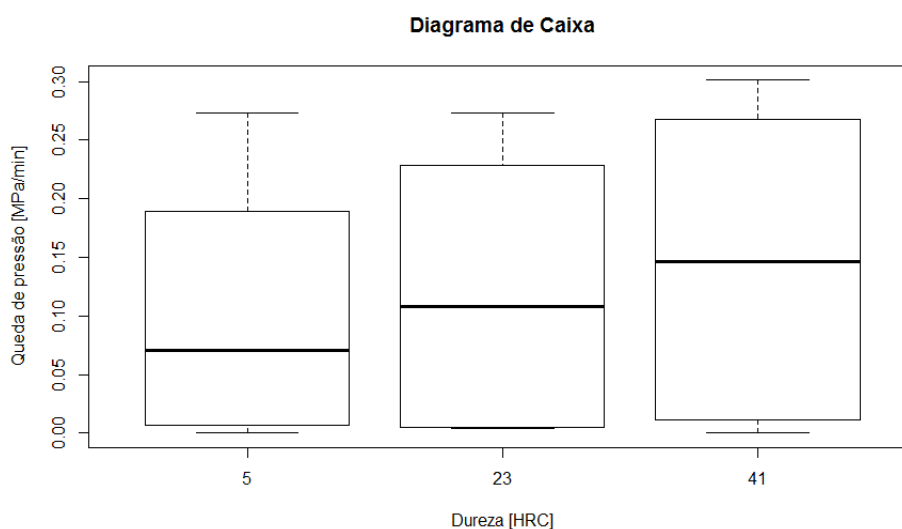


Figura 4.6: Diagrama de caixa para a variável dureza. Fonte: Autor.

A figura 4.6 mostra que a mediana da taxa de queda de pressão apresenta um aumento quando a dureza varia de 5 a 41 Rockwell C. Esta constatação vai ao encontro da percepção de que, quanto maior a resistência à deformação, menor a capacidade de acomodação das asperidades nos vazios da superfície por e, portanto, menor a capacidade de construir a barreira mecânica ao escoamento do fluido. Por outro lado, o tamanho da caixa indica a alta dispersão dos dados e todas as dispersões dos conjuntos estão englobando todas as medianas. Novamente pode-se utilizar como critério o resultado do teste da mediana, que para este caso fornece:

Tabela 15: Resultado do teste da mediana para o fator dureza.

Nível de Dureza	Mediana	1º Quartil	3º Quartil	População
5	0.0705	0.009	0.18075	a
23	0.1080	0.005	0.21275	a
41	0.1460	0.0110	0.268	a

O resultado indica que as medianas observadas para os três níveis de dureza não são diferentes, ou seja, pertencem a uma mesma população, indicativo fornecido pelo código “a”.

Analogamente, pode-se construir o diagrama de caixas para o fator rugosidade, conforme mostra a figura 4.7 abaixo:

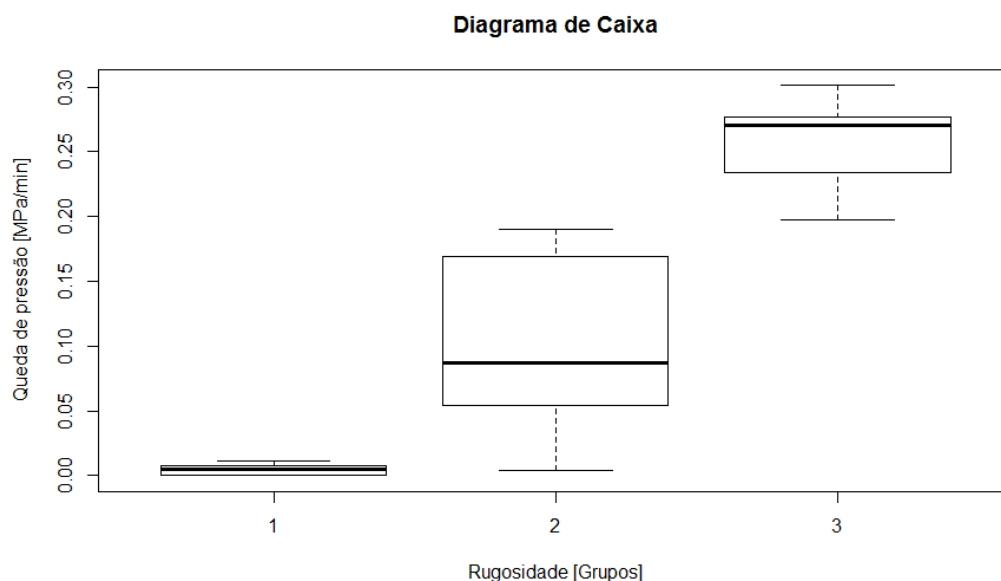


Figura 4.7: Diagrama de caixa para a variável rugosidade. Fonte: Autor.

No que diz respeito ao diagrama de caixa para a variável rugosidade, a leitura é oposta. É perceptível que as dispersões não se sobrepõem e que as medianas estão razoavelmente distantes. Efetuando o mesmo teste de medianas, a resposta é a seguinte:

Tabela 16: Resultado do teste da mediana para o fator Rugosidade.

Nível de Rugosidade	Mediana	1º Quartil	3º Quartil	População
1	0.0045	0.0000	0.00625	a
2	0.087	0.054	0.16900	b
3	0.2705	0.2468	0.27500	c

Assim, os níveis de rugosidade, cujos códigos são referentes às faixas de rugosidades utilizadas, pertencem a grupos estatisticamente diferentes, indicado pela classificação de que cada nível de rugosidade pertence a uma população diferente (*a*, *b* e *c* na tabela). Isto significa que ela é um fator relevante para a variação da resposta do experimento.

Uma outra avaliação interessante é a Análise de Variância (ANOVA). Da mesma forma, ela visa avaliar se existe diferença significativa entre as médias dos fatores (dureza e rugosidade), de seus níveis e se estes exercem influência sobre a variável resposta. O ponto interessante desta avaliação é que ela ajuda a identificar se as diferenças encontradas entre as amostras são fruto da mera variabilidade amostral ou se são decorrentes de real interferência dos fatores escolhidos. Nas figuras 4.8 a 4.14 são mostradas as dispersões dos resultados em função das variáveis *Ra*, *Rq*, *Rt*, *Rda*, *Rdq*, assimetria e curtose, respectivamente.

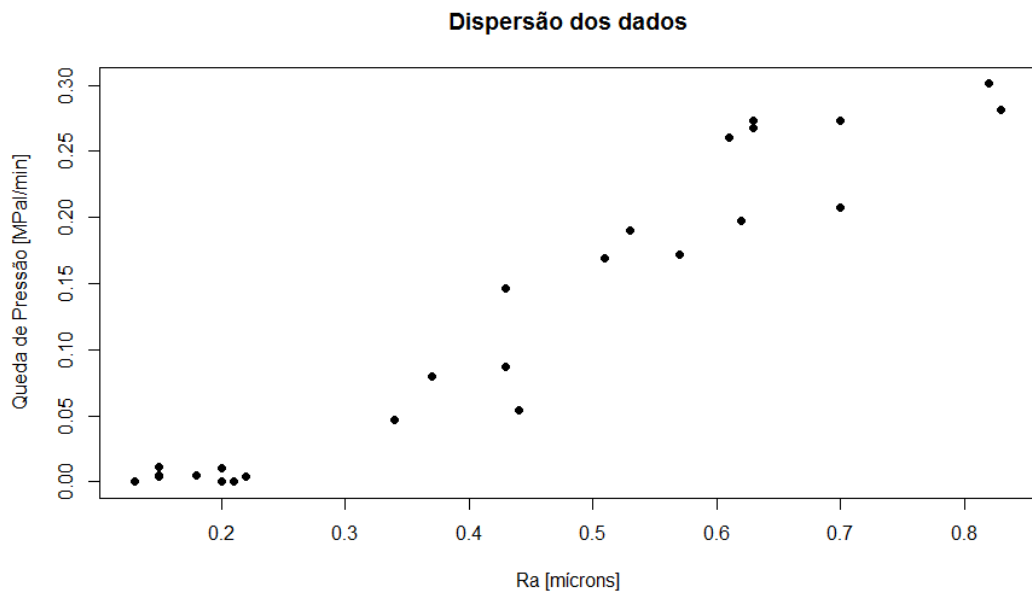


Figura 4.8: Dispersão da queda de pressão com a rugosidade Ra . Fonte: Autor.

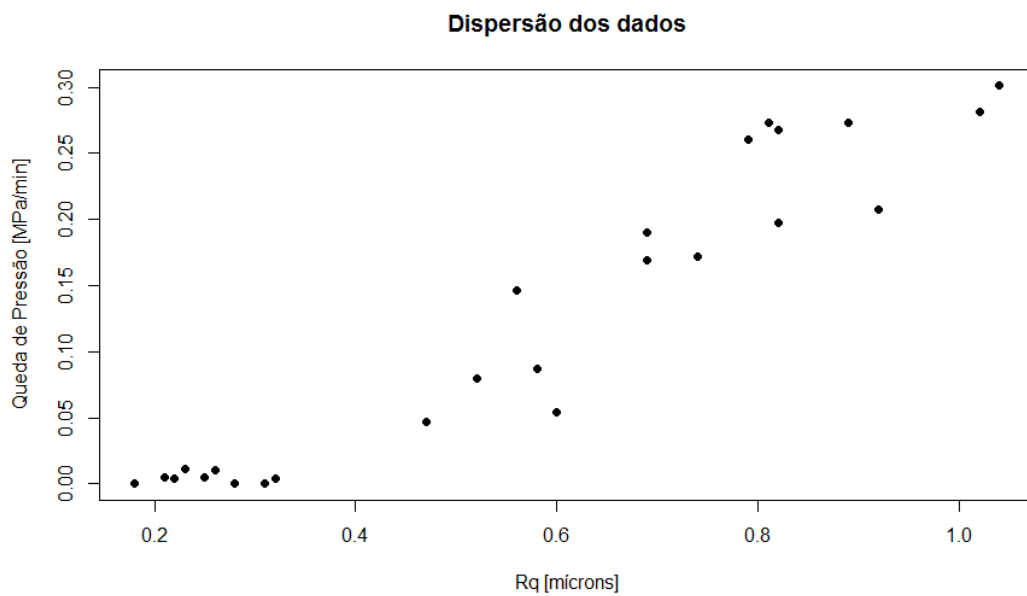


Figura 4.9: Dispersão da queda de pressão com a rugosidade Rq . Fonte: Autor.

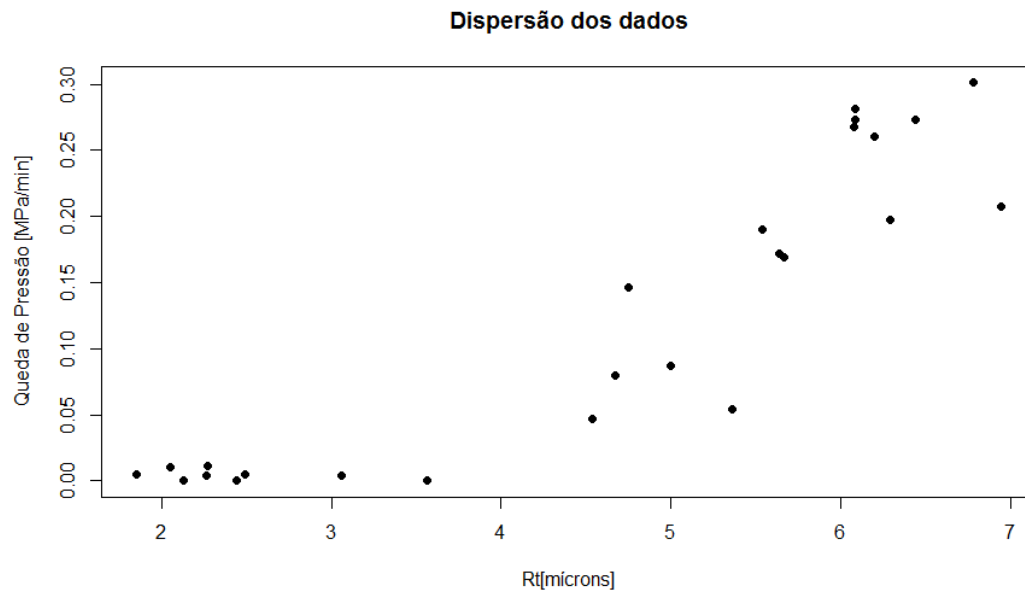


Figura 4.10: Dispersão da queda de pressão com o parâmetro R_t . Fonte: Autor.

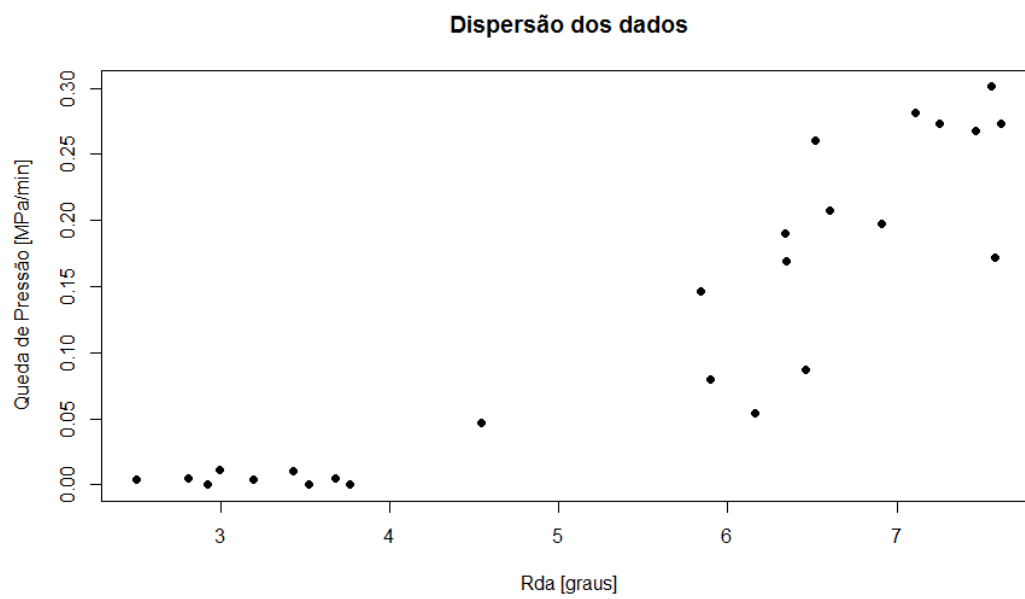


Figura 4.11: Dispersão da queda de pressão com o parâmetro R_{da} . Fonte: Autor.

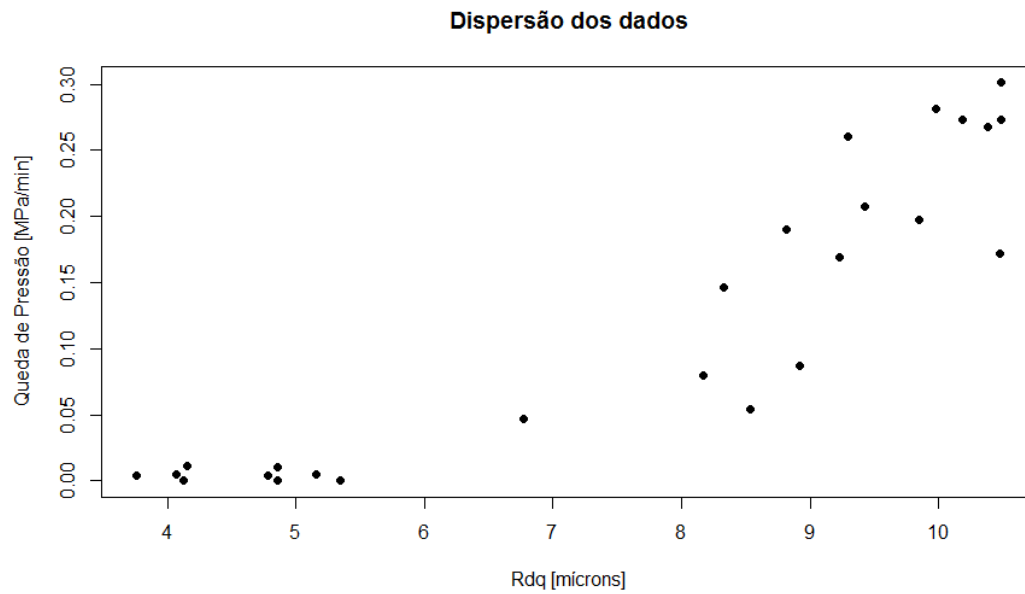


Figura 4.12: Dispersão da queda de pressão com o parâmetro Rdq . Fonte: Autor.

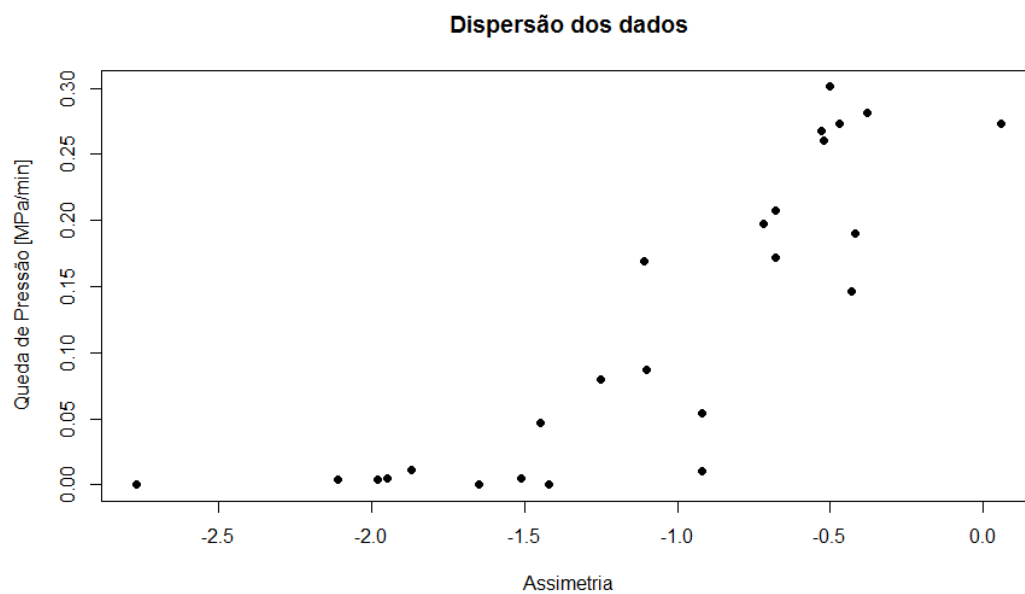


Figura 4.13: Dispersão da queda de pressão com a assimetria da distribuição de alturas.
Fonte: Autor.

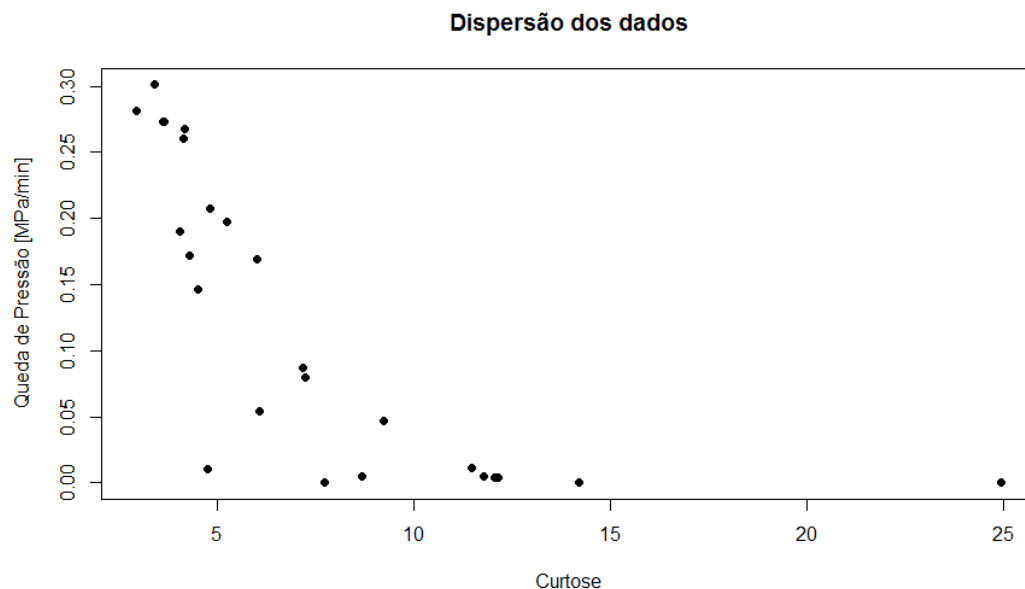


Figura 4.14: Dispersão da queda de pressão com a curtose da distribuição de alturas.

Fonte: Autor.

Com exceção da figura 4.14, os demais gráficos indicam, em algum grau, um aumento da taxa de queda de pressão quando os valores absolutos das variáveis aumentam. Importante ressaltar que o experimento foi dimensionado pela quantidade mínima de ensaios e a dispersão dos resultados requer uma análise mais detalhada desta relação.

Na ANOVA, as variâncias são utilizadas para obter um ajuste de regressão linear por mínimos quadrados. Um teste estatístico (teste de Fischer) é utilizado para verificar as hipóteses de semelhança de médias.

Realizando a análise de variância para um modelo linear em que dureza e rugosidade são as variáveis independentes, sem interação, a análise fornece a seguinte resposta:

Tabela 17: Tabela de ANOVA para o modelo linear sem interação.

Fonte	Graus de Liberdade	Soma de quadrados	Média dos Quadrados	Valor F	Valor P
Rugosidade	1	0.25629	0.25629	125.785	1.44E-10
Dureza	1	0.00291	0.00291	1.427	0.245
Resíduo	22	0.04483	0.00204		

Refazendo a análise, desta vez incluindo uma interação entre estes fatores, a resposta fica da forma:

Tabela 18: Tabela de ANOVA para o modelo linear com interação.

Fonte	Graus de Liberdade	Soma de quadrados	Média dos Quadrados	Valor F	Valor P
Rugosidade	1	0.25629	0.25629	125.057	2.64E-10
Dureza	1	0.00291	0.00291	1.419	0.247
Rugosidade:Dureza	1	0.00179	0.00179	0.873	0.361
Resíduo	21	0.04304	0.00205		

Nesta análise, o valor p obtido é comparado com a confiabilidade alvo, determinada como 0,05, onde um valor inferior ao alvo reflete significância estatística. Valores acima deste indicam que o fator estudado não contribui para a variabilidade dos resultados observados.

Os resultados obtidos pela Análise de Variância são os mesmos obtidos pela análise do diagrama de caixas e o teste de medianas. A significância do fator dureza para a variação da taxa de queda de pressão observada é irrelevante, embora tenha havido sinalização gráfica de sua participação. Isso pode ser explicado pela limitação da quantidade de dados disponíveis, ou seja, um maior número de observações seria necessário na tentativa de melhor avaliar a influência da dureza sobre a taxa de queda de pressão.

Por outro lado, o fator rugosidade obteve, em todas as análises, indicação clara de participação sobre o resultado. Tanto no diagrama de caixas quanto nos testes de mediana e análise de variância os resultados foram concordantes. Estas análises, no entanto, não reconhecem a propriedade física por trás dos valores utilizados nos cálculos. Trata-se de ferramentas matemáticas que avaliam a relação entre conjuntos de números. A real validade dos resultados depende do fundamento físico empregado na construção do experimento. No caso da rugosidade, o resultado obtido concorda com o resultado esperado, na medida em que se considerou que valores de rugosidade menores levariam a taxas de queda de pressão menores.

4.3 Avaliação dos Parâmetros de Superfície

Dito isto, o agrupamento feito para as faixas de rugosidade pode ser desmembrado agora para testarmos os diferentes parâmetros superficiais medidos em conjunto com a rugosidade média aritmética Ra . Estes parâmetros, cujas definições foram dadas na seção 2.1, são as medidas Rq , Rv , Rt , Rda , Rdq , RSm , Rsk , Rku e RPc .

Dentre os parâmetros avaliados, dois são relativos à amplitude da distribuição das alturas das asperidades. Os parâmetros Rsk e Rku são relativos à assimetria e curtose, respectivamente. No contexto deste trabalho, a interpretação geométrica destes parâmetros pode contribuir para a avaliação dos resultados.

Pelo exemplo dado na figura 2.6, pode-se supor que superfícies com assimetria negativa poderiam apresentar melhor desempenho para vedação, uma vez que, após um desgaste inicial dos poucos picos, uma quantidade grande de material entraria em contato com a superfície par, aumentando a área de contato. Consequentemente, superfícies com assimetria positiva tenderiam a apresentar desempenho inferior, uma vez que mesmo após um desgaste inicial dos picos, ainda haveria muitos espaços entre as regiões de contato.

Observando, no entanto, a tabela de dados (Apêndice D), nota-se que todas as amostras apresentaram assimetria negativa, impedindo que se possa extrair conclusões sobre esta característica. O parâmetro de assimetria foi então descartado.

O próximo parâmetro de distribuição avaliado é a curtose. Novamente, tomando os dados da tabela do Apêndice D, é possível ver que todos os corpos de prova apresentaram valores de curtose muito próximos ou superiores a três. Por esta razão, este aspecto também foi retirado das análises.

As dispersões foram mostradas, para cada parâmetro, no conjunto de figuras 4.6 a 4.12. Partindo inicialmente daquelas cujos mapas de pontos sugerem relação linear, é possível testar uma regressão linear multivariada e avaliar, por exemplo, o coeficiente de determinação múltipla R^2 ,

Lembrando que os pares Ra e Rq e Rda e Rdq são semelhantes, tendo apenas a forma de cálculo diferenciada. Como Ra e Rda são médias aritméticas, a presença de valores extremos é suavizada, enquanto que para Rq e Rdq , por serem médias quadráticas, os valores extremos tendem a torná-los ligeiramente maiores que seus pares.

Agora é feita a análise pelo gráfico de dispersão da taxa de queda de pressão versus o espaçamento entre picos RSm , mostrado na figura 4.15 abaixo e omitido intencionalmente na seção anterior. Em função da definição de pico utilizada na literatura, o espaçamento entre entidades forneceria uma informação semelhante à uma densidade. O espalhamento destes picos em uma dada região, somado à informação da curtose sobre a distribuição das alturas em torno da medida central, poderia estabelecer uma subdivisão geométrica das superfícies. No entanto, como já verificado anteriormente, todas as superfícies testadas apresentaram a mesma característica de curtose, impossibilitando a análise comparativa.

Da mesma forma, a dispersão das taxas em função dos valores de espaçamento medidos percorre toda a escala de resultados de maneira bastante espalhada. A associação entre as grandezas mencionadas, cuja avaliação mais interessante ainda dependia da curtose, também foi descartada.

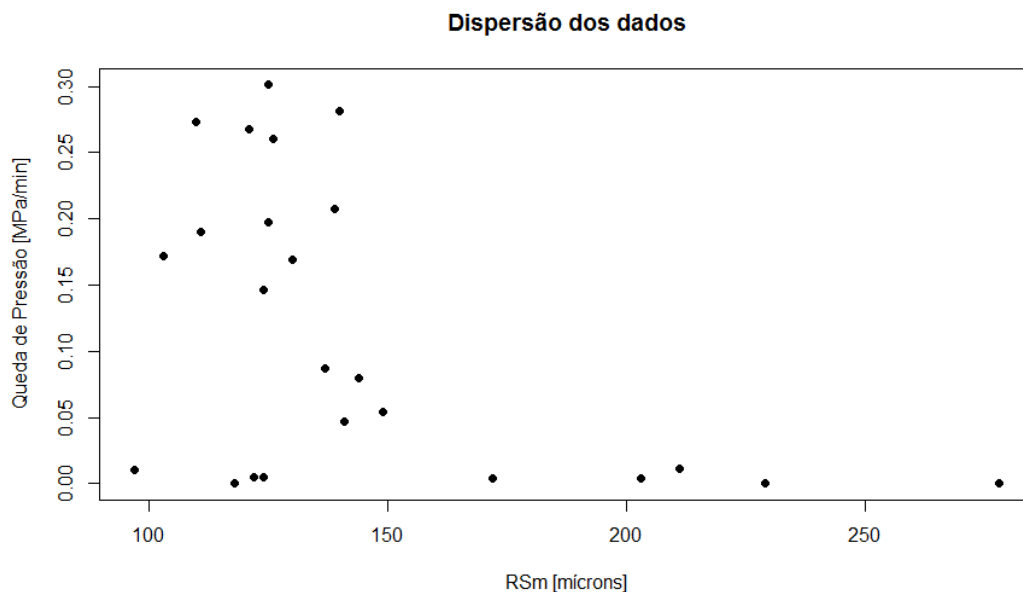


Figura 4.15: Dispersão da queda de pressão com o espaçamento médio entre picos (RSm). Fonte: Autor.

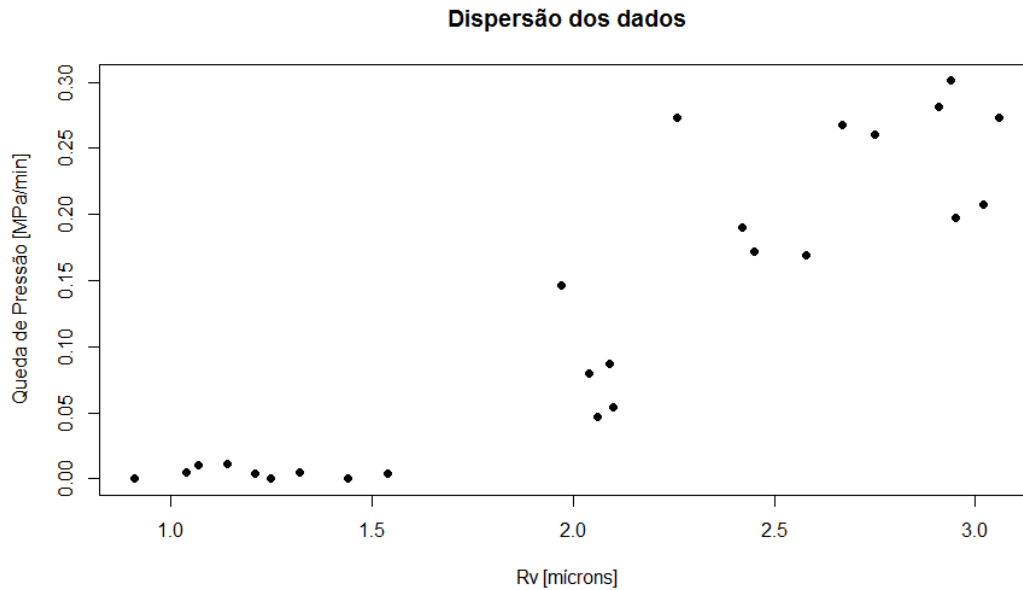


Figura 4.16: Dispersão da queda de pressão com o parâmetro R_v . Fonte: Autor.

O parâmetro R_v , cuja dispersão é mostrada na figura 4.16 acima, foi considerado de interesse por representar, de certa forma, a ausência de material. Em outras palavras, R_v teria potencial para explicar a variação da taxa de queda de pressão por uma questão geométrica do problema avaliado. Se lembrarmos que a vedação ocorre pela imposição de uma barreira física ao escoamento, vales muito profundos poderiam não ser cobertos pelas asperidades da superfície par e permitir a passagem do fluido. A dispersão em função de R_v pode ser vista na figura 4.16.

4.4 Regressão Linear

Após a avaliação inicial entre o significado topográfico de cada parâmetro e a dispersão encontrada em função da taxa de queda de pressão, é possível buscar o ajuste destes fatores num modelo matemático. A premissa para a combinação de fatores é de que devem possuir alguma associação geométrica. Estas associações serão elaboradas em função da definição de cada parâmetro. Os modelos formulados serão, inicialmente, lineares.

A regressão linear pode ser realizada de duas formas: com ou sem interação entre os fatores. Pelo padrão do *software R*, o modelo onde não há interação é codificado pelo sinal de soma entre os fatores, enquanto o outro utiliza o sinal de multiplicação. Os dois cenários são avaliados em todas as regressões executadas.

Por se tratar da variável típica de especificação de acabamento superficial, a rugosidade Ra fará parte de todos os modelos propostos. Tendo como base a explicação dada ao final da seção anterior, um modelo contendo a média aritmética das alturas Ra e o valor do maior vale no perfil Rv será testado. Iniciando pela modelo sem interação, os coeficientes obtidos e a significância estatística, com confiabilidade alvo de 95%, podem ser vistos na tabela abaixo. A inclusão de Rv no modelo de regressão linear juntamente com Ra fornece um coeficiente R^2 da ordem de 0,92.

Tabela 19: Coeficientes e significância para o modelo $Ra + Rv$.

Termo	Coeficiente	Desvio Padrão	Valor t	Valor p	Significância
Constante	0.061	0.02786	-2.19	0.0394	95%
Ra	0.56512	0.10316	5.478	1.67E-05	99.99%
Rv	-0.02942	0.03259	-0.903	0.3764	

O resultado expresso na tabela 19 acima pode ser reescrito na forma:

$$Tx = 0,56512Ra - 0,02942Rv + 0,061, \quad (23)$$

em que:

Tx é a taxa de queda de pressão;

Ra é o valor da rugosidade média Ra ;

Rv é o valor da profundidade máxima de vale Rv .

Os mesmos parâmetros, testados com interação, fornecem o resultado da tabela 20. Para este segundo modelo, o R^2 obtido também foi de 0,92.

Tabela 20: Coeficientes e significância para o modelo $Ra * Rv$.

Termo	Coeficiente	Desvio Padrão	Valor t	Valor p	Significância
Constante	-0.056716	0.044142	-1.285	0.2128	
Ra	0.543027	0.203209	2.672	0.0143	95.00%
Rv	-0.030813	0.035098	-0.878	0.3899	
$Ra*Rv$	0.007823	0.061499	0.127	0.9000	

Neste momento é importante ressaltar que a mudança nos níveis de significância de uma mesma variável entre os modelos é normal. Isto significa que, para cada modelo,

os parâmetros desempenham papéis de maior ou menor relevância. O ponto crítico é, então, propor um modelo que tenha um fundamento físico robusto associado.

Nos casos acima, Ra e Rv foram considerados relevantes por seu significado geométrico, daí a busca pela interação ou não entre os mesmos faz parte da avaliação dos resultados experimentais. Cabe ressaltar o alto grau de determinação destas variáveis com a taxa de queda de pressão. Um coeficiente R^2 da ordem de 92% pode ser considerado satisfatório para análises de dados experimentais.

Continuando a observação do comportamento dos parâmetros selecionados, nos concentramos agora na variável RPc . Ela representa o número de picos por centímetro que estaria associado à cada superfície, considerando o perfil dela extraído. A sua dispersão com a taxa de queda pode ser vista na figura 4.17 abaixo:

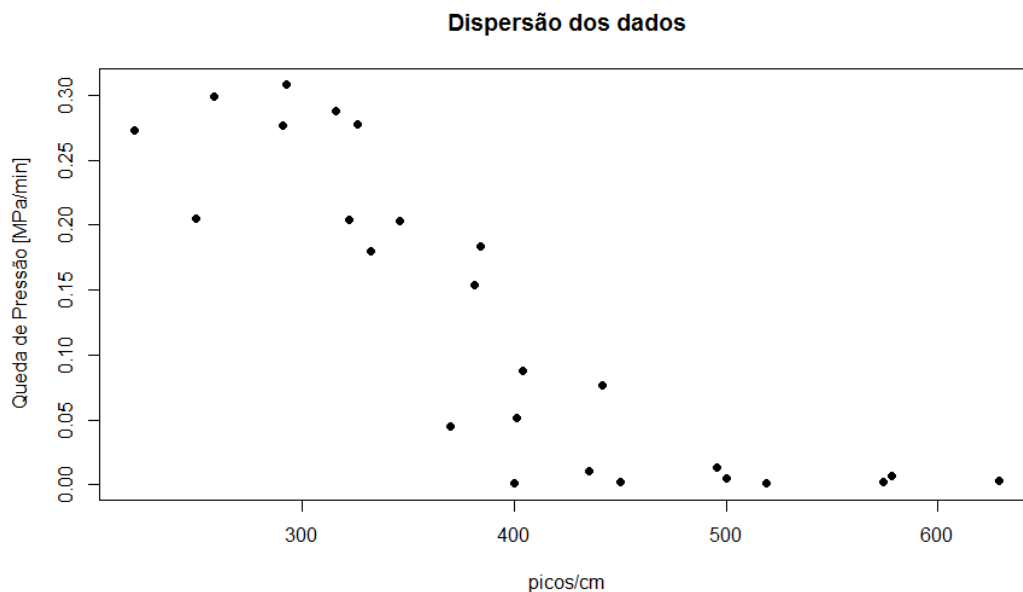


Figura 4.17: Dispersão da queda de pressão com o número de picos. Fonte: Autor.

A primeira interpretação deste gráfico é de que a taxa diminui quando há um aumento do número de picos por centímetro. De certa forma, é também um parâmetro que expressa densidade das asperidades da superfície, sem, no entanto, fornecer qualquer informação quanto à sua distribuição ou mesmo a de suas alturas. A relevância física desta característica já foi explicada na abordagem do parâmetro RSm . A quantidade de picos, no entanto, não remete a nenhum parâmetro de controle da produção da superfície. Ao

levantar a relação entre a contagem de picos e Ra , encontra-se o comportamento mostrado na figura 4.18:

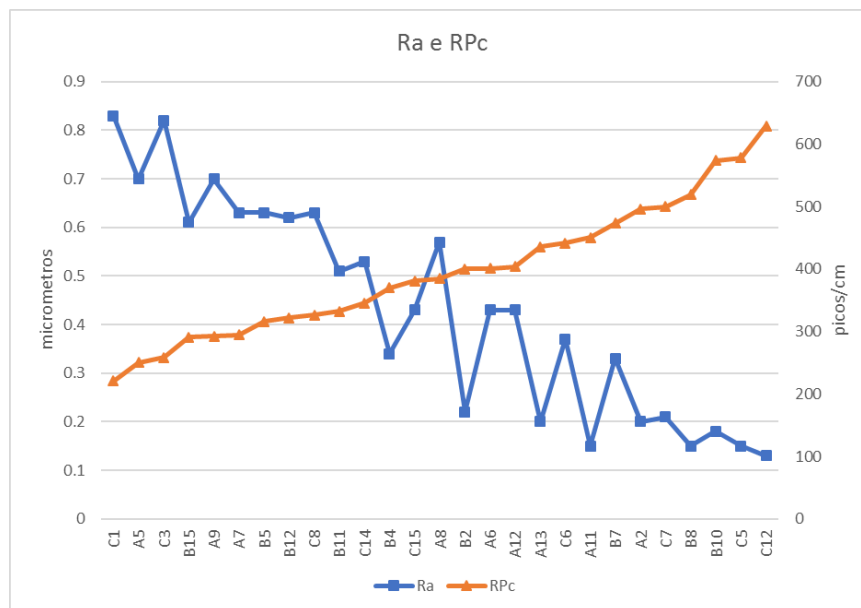


Figura 4.18: Variáveis Ra e RPc para os corpos de prova do experimento 2. Fonte: Autor.

Apesar de haver certa dispersão dos valores, é nítida a percepção de que o número de picos está associado de alguma forma com a rugosidade Ra . De fato, se utilizarmos os dados da superfície de referência (gaveta de válvula submarina), cuja rugosidade Ra média em seis medições foi de $0,078 \mu\text{m}$, o número médio de picos por centímetro foi de 923. Uma hipótese para esta associação pode ser o fato de que a obtenção de rugosidades médias menores (melhores acabamentos) impõe a condição de que os processos de fabricação sejam mais precisos e, estes, por sua vez, acabem provocando uma maior homogeneização da geometria dos picos. A gaveta utilizada tem a superfície produzida por lapidação, um processo de desgaste superficial no qual um fluido com partículas abrasivas de alta dureza (diamante, por exemplo) e de tamanho controlado promove o desgaste da peça num deslizamento suave sobre uma pedra polida retificada e com rigoroso controle de planicidade. Tomando agora uma amostra maior, que seriam os dados de superfície de todos os corpos de prova disponíveis para o primeiro experimento, tem-se a relação da figura 4.19:



Figura 4.19: Variáveis *Ra* e *RPc* para os corpos de prova do experimento 1. Fonte: Autor.

O número de picos por centímetro tem dimensão semelhante à taxa de material ou ao espaçamento médio entre picos. Ele fornece uma medida sobre a capacidade aparente de contato sem, no entanto, qualificar adequadamente a extensão e a distribuição deste contato. Por sua relação inversamente proporcional à rugosidade *Ra*, o número de picos *RPc* será adicionado ao modelo linear investigado.

Voltando um pouco nas variáveis exploradas, é interessante lembrar que a grandeza *RSm* informa o espaçamento médio entre picos. Inicialmente foi considerado que esta informação deveria ser avaliada em conjunto com a curtose (*Rku*), com o objetivo de categorizar geometricamente grupos distintos de superfícies. Tendo a contagem linear de picos manifestado relação com a rugosidade, o parâmetro *RSm* passa a ter o potencial de completar a caracterização da densidade de picos de um determinado perfil. Aliados à rugosidade média *Ra*, o conjunto de informações sobre quantidade, altura média e densidade espacial constrói uma possibilidade interessante de explicar as taxas de queda de pressão obtidas pelo vazamento de gás na interface.

Iniciando a investigação das três variáveis em conjunto, o modelo sem interação fornece um R^2 de 0,914 e coeficientes e significâncias conforme abaixo:

Tabela 21: Coeficientes e significância para o modelo $Ra + RSm + RPc$.

Termo	Coeficiente	Desvio Padrão	Valor t	Valor p	Significância
Constante	-1.35E-01	9.08E-02	-1.489	0.151	
Ra	5.18E-01	7.23E-02	7.165	4.60E-07	99.99%
RPc	1.19E-04	1.58E-04	0.753	0.46	
RSm	-9.10E-05	1.85E-04	-0.492	0.628	

A adição de variáveis aos modelos lineares é sempre delicada. A avaliação feita pelas contribuições precisa ser cautelosa e pautada no conhecimento fenomenológico do que foi observado. Tendo sido explicitada uma aparente relação entre Ra e RPc , o modelo com interação entre estes fatores parece adequado. Para completar, é preciso lembrar que todas as regressões foram feitas até agora com a equação padrão de reta, ou seja, contendo uma constante. Se considerarmos a existência hipotética de uma superfície perfeita, isenta de erros de forma e rugosidades, os parâmetros de superfície deveriam apresentar valores nulos. De modo que o modelo não produza um valor de queda de pressão para uma superfície perfeita, a constante precisa ser igual a zero. Assim, produzimos um modelo mais consistente com as premissas do fenômeno. O termo independente será removido da avaliação. A nova regressão linear produz, então, o seguinte resultado para a forma $Ra*RPc*RSm$:

Tabela 22: Coeficientes e significância para o modelo $Ra * RSm * RPc$.

Termo	Coeficiente	Desvio Padrão	Valor t	Valor p	Significância
Ra	1.81E+00	7.38E-01	2.452	0.0246	99%
RPc	-9.71E-05	1.97E-04	-0.493	0.6278	
RSm	1.02E-04	4.84E-04	0.21	0.835	
$Ra:RPc$	-2.90E-03	2.45E-03	-1.184	0.2519	
$Ra:RSm$	-9.97E-03	5.49E-03	-1.816	0.0861	95%
$RPc:RSm$	-8.93E-08	1.49E-06	-0.06	0.9527	
$Ra:RPc:RSm$	1.85E-05	1.79E-05	1.033	0.3152	

O modelo testado apresentou um coeficiente R^2 de 0,9764, uma melhora substancial em relação aos modelos anteriores, além de uma associação mais robusta entre os fatores estudados. Apesar do grande incremento no coeficiente de determinação, nesta configuração, cinco das sete variáveis perdem significância estatística. Este critério tem sido a base das comparações feitas ao longo deste trabalho, pois avalia o aspecto de representatividade do resultado obtido em termos de probabilidade. Considerando os

dados contidos na tabela acima, o modelo pode ser revisto para considerar apenas a interação entre Ra e RSm , cuja significância foi evidenciada, mas mantendo o fator RPc , também já considerado de alta relevância fenomenológica. Com este último ajuste, obtém-se:

Tabela 23: Coeficientes e significância para o modelo $Ra * RSm + RPc$.

Termo	Coeficiente	Desvio Padrão	Valor t	Valor p	Significância
Ra	9.38E-01	1.50E-01	6.246	3.39E-06	99.99%
RPc	-3.28E-04	8.41E-05	-3.896	0.000833	99.99%
RSm	8.58E-04	3.20E-04	2.684	0.013888	99.90%
$Ra:RSm$	-4.81E-03	1.37E-03	-3.504	0.002113	99.99%

O coeficiente R^2 deste modelo foi de 0,9721. Uma redução desprezível em relação ao anterior, mas com uma marcante característica de significância de todas as variáveis, acima do limite mínimo estabelecido de 95%. Este resultado é interessante porque agrega significado físico e solidez estatística à avaliação. O modelo linear obtido pode ainda ser verificado sob outros aspectos, conforme mostrado nos gráficos abaixo. A figura 4.20 mostra a dispersão entre os resíduos e os valores ajustados pelo modelo.

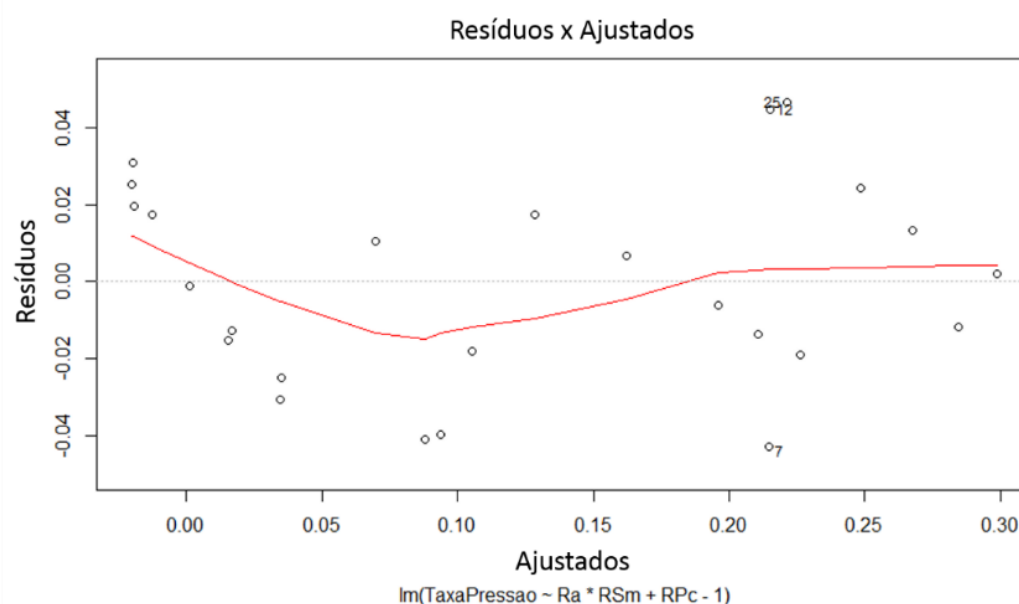


Figura 4.20: Resíduos x valores ajustados pelo modelo. Fonte: Autor.

Os resíduos, embora pareçam dispersos em função da escala, estão bastante próximos de zero. Além disso a distribuição é bastante simétrica, sem apresentar

tendência, e aleatória, indicando que os resíduos guardam predominantemente o erro aleatório do modelo. A curvatura pode indicar que há uma parcela muito discreta de não-linearidade dos dados e que foi depositada nos resíduos. No entanto, dada a baixa amplitude desta dispersão, o modelo linear ainda se mostra adequado.

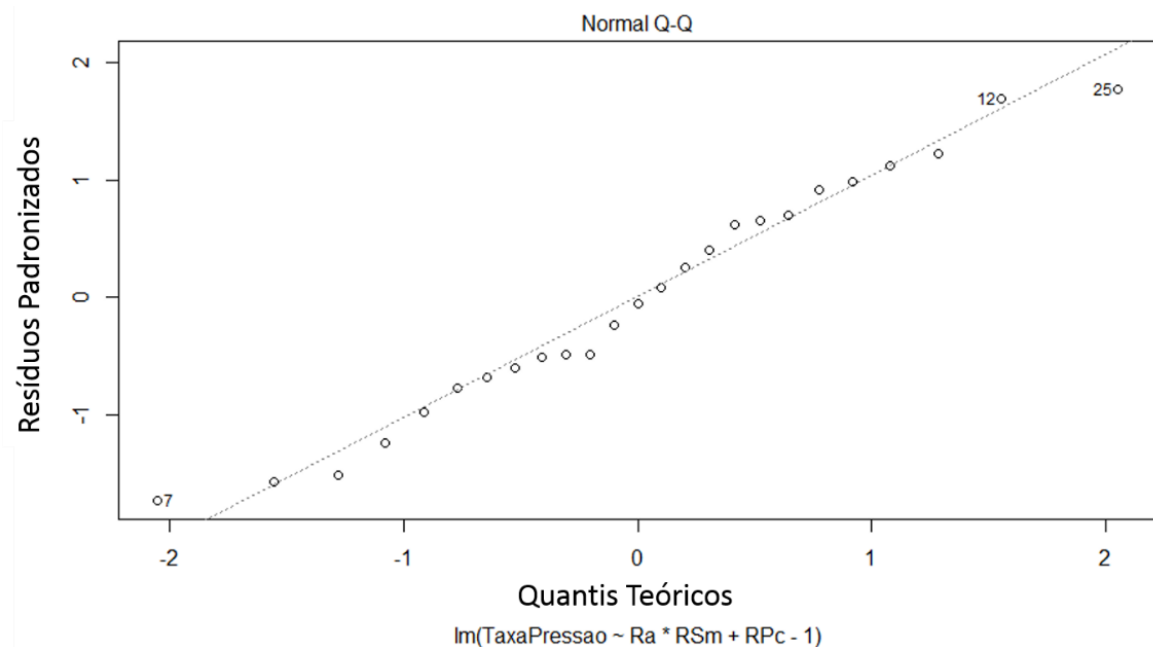


Figura 4.21: Curva Normal Q-Q. Fonte: Autor.

Uma das premissas das análises estatísticas é a de que os resíduos tenham distribuição próxima da Gaussiana. Uma forma de fazer esta verificação é fazendo uso de um gráfico chamado Normal-QQ, ilustrado na figura 4.21. Neste gráfico, a linha pontilhada representa a distribuição Normal. Os pontos espalhados ao longo do gráfico mostram como está a distribuição dos resíduos. Se forem próximos à linha, então a sua distribuição é próxima da Normal. A avaliação da figura 4.21 indica que esta proximidade existe, ou seja, o pressuposto do modelo foi atendido.

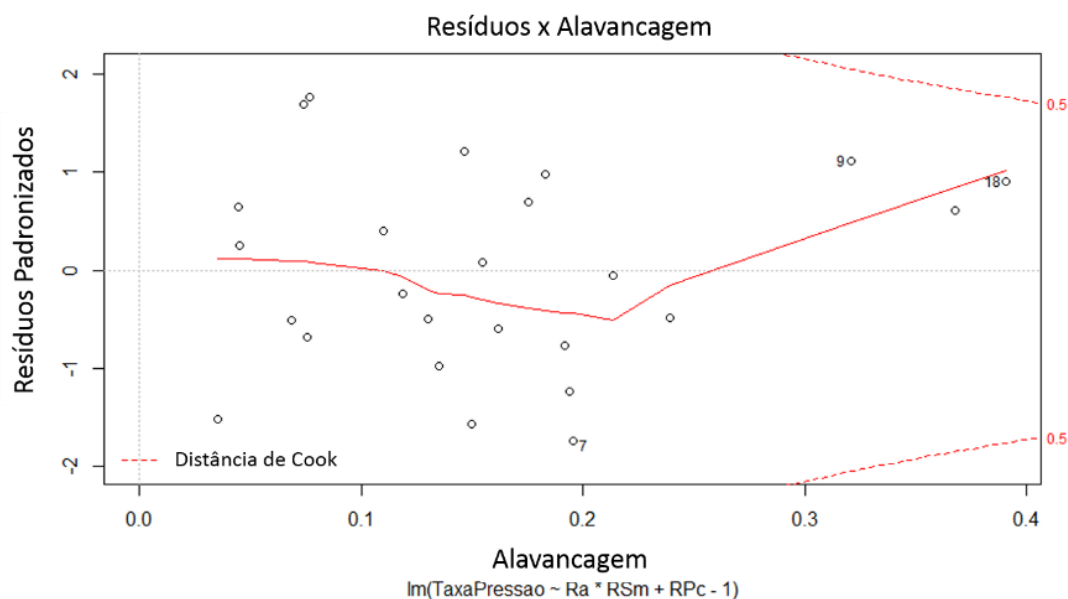


Figura 4.22: Resíduos normalizados x alavancagem. Fonte: Autor.

O gráfico da figura 4.22 faz uma avaliação da alavancagem dos resíduos padronizados, ou seja, avalia graficamente a capacidade de um valor afetar a regressão. Em geral, é usado para mostrar se pontos extremos, que poderiam ser considerados como erro e descartados, afetariam ou não o resultado da regressão linear. O efeito de pontos relevantes sobre o modelo pode se refletir nos coeficientes das variáveis e no R^2 . Estes pontos são considerados relevantes se apresentarem um valor superior ao parâmetro de Cook, representado no gráfico por uma linha tracejada. A figura indica que nenhum dos resíduos violou o critério de alavancagem, mostrando que não há pontos extremos com grande peso na construção do modelo.

Finalmente, é possível então fazer uma análise crítica do resultado encontrado, escrito matematicamente como:

$$Tx = 0,938Ra - 0,000328R_{Pc} + 0,000858R_{Sm} - 0,00481Ra * R_{Sm} \quad (24)$$

Os coeficientes respeitam a ordem de grandeza das variáveis utilizadas. R_{Pc} e R_{Sm} são, em média, da ordem de 10^2 , enquanto Ra e a Taxa são da ordem de 10^{-1} . Isto mostra que há equilíbrio nas contribuições de cada parcela para o resultado. Quanto aos sinais presentes na equação, tem-se que quanto maiores os valores de Ra e R_{Sm} , maior será a taxa.

Este resultado confirma a avaliação feita na montagem do modelo. O parâmetro Ra fornece a informação sobre a média de alturas e profundidades de picos e vales e um valor baixo aproxima a superfície rugosa de uma superfície plana ideal. Na equação, valores altos de Ra elevam o valor da Taxa.

Já o valor de RSm é o espaçamento médio entre picos e fornece uma medida de densidade linear. Se seus valores forem altos, há menor quantidade de material para formar uma barreira ao escoamento. O sinal positivo no modelo indica que quanto mais espaçados estiverem os picos, maior será a taxa de queda de pressão.

A contagem de picos expressa no parâmetro RPc foi considerada uma medida complementar ao parâmetro RSm na caracterização da densidade de picos. O modelo expressa uma diminuição na taxa de queda de pressão quando há aumento da quantidade de picos por centímetro.

Uma grande quantidade linear de picos, com espaçamentos pequenos entre si e altura média com valores baixos constitui uma superfície repleta de barreiras uniformes e aglomeradas. Outra interpretação possível seria a de que os picos de rugosidade, quando uniformes num baixo valor médio de alturas e com grande densidade linear, promove o aparecimento de barreiras sucessivas, dependentes do espaçamento médio entre as aglomerações de picos. Esta interposição sequencial de barreiras, no entanto, não impede que ocorra o escoamento de fluido entre as duas regiões de alta e baixa pressão. Seu papel é o de dificultar este escoamento, impondo maior perda de carga por unidade de comprimento.

Como visto nos resultados do primeiro conjunto de testes, o fator carga deve ser incorporado ao modelo para completar a lista de fatores analisados que afetam o desempenho do sistema de vedação metálico. Independente da combinação dos parâmetros, tendo em vista que uma superfície perfeita e, portanto, uma interface com pleno contato, não é possível de ser produzida, pode-se afirmar que sempre haverá escoamento quando houver diferencial de pressão, sendo este função da escala de tempo escolhida.

Nos trabalhos sobre modelos de vazamento, o afastamento médio entre as superfícies é o parâmetro que melhor absorve as grandezas de engenharia de fato mensuráveis. O tratamento destes modelos, no entanto, requer uma descaracterização das

formas convencionais e regrida o objeto a alguns poucos termos, tais como a distribuição das alturas das asperidades ou seu desvio padrão.

O parâmetro típico usado no âmbito acadêmico é o Rq , devido a sua sensibilidade à presença de valores extremos. Em teoria, ele daria maior rigor aos modelos quando comparados com medições de superfícies reais. No entanto, conforme discutido na seção 2.5, há uma forte difusão da representação de superfícies por geometrias fractais. Primeiro porque há muitas superfícies reais que demonstram similaridade com a teoria de fractais de repetição de elementos topográficos básicos. Segundo porque já há um equacionamento robusto destes elementos que nasceu numericamente, facilitando a implementação de rotinas de geração de superfícies e de variação de parâmetros.

O resultado obtido neste trabalho por meio da combinação de três fatores de caracterização topográfica acorda, em parte, com a metodologia utilizada para geração de superfícies numéricas. Estas representações de superfícies reais precisam de informações de frequência espacial [12] para gerar alturas de picos e sua densidade espacial. O experimento mostrou que parâmetros semelhantes podem ser obtidos por medições perfilométricas e representados pela altura aritmética média, espaçamento entre picos e densidade linear de picos.

Alguns trabalhos mostraram como os vazamentos ocorrem sobre defeitos superficiais sobrepostos a superfícies construídas com padrões de repetição. Foi evidenciado em [37], por meio de estudo numérico, que este padrão traz um benefício para o efeito de vedação pela imposição de barreiras sequenciais e, portanto, minimizando a existência de atalhos gerados pela presença dos defeitos.

Num trabalho semelhante [38], mas com dados experimentais, chegou-se à conclusão de que os parâmetros típicos de superfície não eram capazes de distinguir entre duas superfícies semelhantes, mas fabricadas com diferentes processos, que obtiveram resultados divergentes de vedação. Foi apresentado um novo parâmetro, chamado parâmetro de ordem, que é independente das medições de altura (amplitude) e das funções de auto correlação, mas cuja avaliação fornece o grau de periodicidade da superfície em questão. De forma semelhante, os resultados aqui obtidos concordam que os parâmetros topográficos comuns, quando considerados isoladamente, não caracterizam adequadamente a superfície para o trabalho de vedação.

Ainda em [38], outra conclusão fornecida é de que os padrões de repetição de fato contribuem para que haja vedação, impondo a sucessão de barreiras já mencionada anteriormente. O ponto interessante deste trabalho é que ele conclui que o super acabamento dado a uma das amostras desgasta os picos maiores e fornece uniformidade sem comprometer a rugosidade do núcleo e dos vales. Esta conclusão é semelhante à explicação encontrada no presente trabalho para associar as variáveis Ra , RSm e RPc .

Nos ensaios realizados, o índice de plasticidade aponta um regime elástico para as asperidades dos materiais de maior dureza, enquanto que o de menor dureza recai justamente na faixa onde o regime não é claro. As medições de rugosidade feitas após os ensaios indicaram, em todos os casos, modificação dos valores dos parâmetros. Em geral, observou-se uma diminuição da rugosidade aritmética média Ra . Este fato expressa a ocorrência de deformações permanentes sobre os picos das asperidades e, sob outro ponto de vista, uma melhora no acabamento da superfície deformada. Este resultado vai ao encontro do que foi pontuado por [38], de que, num contato sob carga, a rugosidade da superfície mais macia tende a se aproximar daquela da superfície mais dura.

Por outro lado, o avanço de trabalhos experimentais que possam confirmar os resultados numéricos, é sensivelmente mais lento. Provavelmente em função da grande diversidade de combinações de parâmetros tanto das superfícies quanto das condições de contorno. Além disso, são experimentos que, em geral, requerem instrumentação de precisão, demasiados cuidados na manipulação e preservação dos corpos de prova e grande número de repetições, com resultados frequentemente limitados e de alta dispersão. Assim, o custo destes experimentos pode não justificar o benefício a ser obtido. Isto faz com que este tipo de conhecimento fique retido na indústria, fazendo parte do diferencial tecnológico das empresas e cujo progresso tem o avanço limitado às necessidades das aplicações.

5. CONCLUSÕES

Os experimentos efetuados abordaram, sob uma metodologia diferente, os fatores mais comuns relacionados à vedação de gases com sistema de contato metálico. Estes fatores são a dureza, a força aplicada e a rugosidade das superfícies. Foi premissa deste estudo, também, limitar a escala de observação àquela tipicamente encontrada na indústria, ou seja, abrindo mão dos mecanismos mais sofisticados de detecção e monitoramento, visando tornar o resultado familiar ao encontrado em problemas de campo.

As variáveis estudadas são de fácil medição, obtidas por instrumentos comerciais e bastante comuns em sistemas de controle de qualidade e metrologia. Além disso, são parâmetros conhecidos previamente ao projeto dos mecanismos de vedação, fazendo com que as relações encontradas possam ser avaliadas antes da colocação em serviço, servindo como suporte na concepção do sistema.

Dois experimentos diferentes foram conduzidos para avaliar os fatores anteriormente citados que afetam o desempenho de um sistema de vedação de gases composto por superfícies metálicas em contato. A metodologia empregada teve, como base, comparações de médias entre grupos com testes estatísticos, tornando a avaliação, inicialmente, isenta das relações pré-estabelecidas pelo conhecimento das variáveis.

O primeiro avaliou a influência da força inicial de fechamento. Os resultados indicaram que um aumento da força leva à diminuição da taxa de queda de pressão. Testes estatísticos mostraram que os níveis de força utilizados realmente provocam efeito sobre a resposta do sistema. Foi possível ainda avaliar, qualitativamente, as participações dos demais fatores, permitindo planejar um segundo experimento, específico para eles.

O segundo experimento tentou neutralizar a participação da força líquida aumentando significativamente a razão entre cargas de abertura e fechamento. Assim, há maior participação das demais variáveis sobre o resultado.

Na escala deste experimento, a dureza revelou-se um fator de menor relevância para a variabilidade dos resultados. Embora cobrindo cerca de 75% da escala Rockwell C, as faixas estreitas e baixas de cargas (cerca de 15% do limite de escoamento) e o regime

de deformações imposto em muito limitam a possibilidade de uma avaliação mais profunda. Embora existam resultados semelhantes na literatura, eles também compartilham de condições específicas de validade para esta afirmação. Para o presente caso, atribui-se esta limitação à baixa quantidade de dados levantados e à existência de faixas de dureza mais extensas em outras escalas, o que poderia fornecer resultados diferentes.

Quando as superfícies em contato apresentam alta dureza, espera-se maior dificuldade no processo de deformação das asperezas e sua consequente acomodação nas irregularidades da superfície par. Esta dificuldade impede o preenchimento dos espaços vazios e a criação de barreiras ao escoamento, diminuindo a efetividade da interface no aspecto de vedação. Este fator é relevante porque a dureza alta é frequentemente utilizada como recurso para aumentar a durabilidade de sistemas de vedação metálicas que apresentem movimento relativo.

Já as variáveis típicas disponíveis para caracterização das superfícies foram avaliadas sob a condição de vazamento interfacial de gás. Tratando o vazamento como dependente somente da geometria resultante, os fatores que descrevem a topologia da superfície foram testados quanto à sua influência sobre a variabilidade das taxas de queda de pressão observadas.

Tendo como base as definições e descrições topográficas de cada variável, buscou-se estabelecer relação de causa e efeito com a taxa de queda de pressão. As dispersões foram analisadas preliminarmente buscando filtrar aquelas de associação mais evidente. Esta é uma avaliação típica de correlação de variáveis em experimentos e que, tendo sido a única, poderia ter levado a conclusões incompletas sobre os resultados.

Utilizando sempre os testes estatísticos para comparação de médias, foi possível avaliar a participação individual e em conjunto destes parâmetros. Tendo inicialmente descartado a variável de espaçamento entre picos devido a sua dispersão, uma avaliação mais cautelosa da propriedade ali representada indicou que, quando associada à altura média das asperidades e à quantidade de picos, sua participação passa a ser significativa na explicação da variância da taxa de queda de pressão.

Em outra perspectiva, foi preciso avaliar a representação física da interação entre as variáveis para validar a opção de inclusão do conjunto num modelo linear. Este, por

sua vez, mostrou boa relação com as observações, indicando que a seleção de parâmetros foi, de fato, adequada.

Retornando ao problema motivador deste trabalho, as conclusões apontam que mais fatores de superfície devam ser incluídos nas análises de falha de sistemas de vedação por interface metálica, bem como a verificação das cargas efetivas de contato.

Por fim, é importante ressaltar que a principal conclusão deste trabalho é que os parâmetros de caracterização superficial RSm e RPc podem contribuir para a avaliação da resposta ao vazamento de interfaces metálicas de vedação. Embora ainda requeiram condições de contorno extremamente limitantes, os modelos frequentemente reduzem a caracterização da superfície a um único parâmetro, ampliando ainda mais suas limitações.

5.1 Próximos Trabalhos

O presente estudo identificou a capacidade de novos parâmetros de superfície explicarem variações na taxa de queda de pressão de um sistema metálico de vedação de gases.

A partir das relações aqui confirmadas passa a ser interessante dar continuidade a algumas investigações. Uma delas, naturalmente, a de testar a inclusão das novas variáveis de superfície RSm e RPc em modelos de vazamento que utilizam apenas um parâmetro topográfico.

Por outro lado, dada a relação entre rugosidade média aritmética, um indicativo universal da qualidade do acabamento superficial, com a densidade linear de picos, é interessante procurar a origem desta relação. Assim, surge a oportunidade para um trabalho com ênfase nos processos de fabricação e nos métodos de obtenção de qualidade superficial. Havendo sucesso na descoberta desta relação, é possível avaliar a possibilidade de uma ou mais destas variáveis passarem a ser parâmetro de projeto de sistemas de vedação metálicos.

A combinação de parâmetros proposta também pode ser utilizada para incrementar modelos computacionais de mecânica de contato em problemas de

escoamento interfacial. Este tipo de trabalho ajudaria a confirmar a hipótese levantada sobre o estabelecimento sucessivo de barreiras homogêneas ao escoamento.

6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SMITH, G. T., *Industrial Metrology – Surfaces and Roundness*, Springer, London, 2002.
- [2] RÀFOLS, F.P., 2018, *Two-scale stochastic modelling and analysis of leakage through metal-to-metal seals*, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, Luleå, Sweden.
- [3] PERSSON, B. N. J., “Contact Mechanics for Randomly Rough Surfaces”, *Surface Science Reports*, v. 61, pp. 201-227, Abr. 2006.
- [4] PERSSON, B. N. J., “Relation between Interfacial Separation and Load: A General Theory of Contact Mechanics”, *Physical Review Letters*, v. 99, pp. 1-4, Set. 2007.
- [5] YANG, C., PERSSON, B.N.J., “Contact mechanics: contact area and interfacial separation from small contact to full contact”, *Journal of Physics: Condensed Matter*, v. 20, 215214, Abr. 2008.
- [6] JACOBS, T., JUNGE, T, PASTEWKA, L., “Quantitative characterization of surface topography using spectral analysis”, *Surface Topography: metrology and Properties*, v.5, 013001, Jan. 2017.
- [7] PAWLUS, P., ZELASKO, W., “The importance of sampling interval for rough contact mechanics”, *Wear*, v. 276-277, pp. 121-129, Dez. 2011.
- [8] GREENWOOD, J. A., WILLIAMSON, J.B.P., “Contact of nominally flat surfaces”, Burndy Corporation Research Division, Norwalk, Connecticut, E.U.A, Abr. 1966.
- [9] KUCHARSKI, S., STARZYNSKI, G., “Study of contact of rough surfaces: Modeling and experiment”, *Wear*, v. 311, pp. 167-179, Jan. 2014.
- [10] KLIMCZAK, T., POLIJANIUK, A., HANDZEL-POWIERZA, Z., “On the experimental verification of the Greenwood-Williamson model for the contact of rough surfaces”, *Wear*, v. 154, pp. 115-124, Ago. 1991.

- [11] ROBBE-VALLOIRE, F., PRAT, M., “A model for face-turned surface microgeometry: Application to the analysis of metallic static seals”, *Wear*, v. 264, pp. 980-989, Set. 2007.
- [12] NAYAK, P., “Random process model of rough surfaces”, *Journal of Lubrication Technology, Transactions of the ASME*, pp. 398-407, Jul. 1971.
- [13] PATIR, N., “A numerical procedure for random surface generation of rough surfaces”, *Wear*, v. 47, pp. 263-277, Mai. 1977.
- [14] ZHANG, X. XU, JACKSON, R.L., “An analysis of generated fractal and measured rough surfaces in regard to their multi-scale structure and fractal dimension”, *Tribology International*, v. 105, pp. 94-101, Set. 2016.
- [15] DURAKBASA, M.N., OSANNA, P.H., DEMIRCIOGLU, P., “The factors affecting surface roughness measurements of the machined flat and spherical surface structures – The geometry and the precision of the surface”, *Measurement*, v. 44, pp. 1986-1999, Set. 2011.
- [16] CIULLI, E., FERREIRA, L.A., PUGLIESE, G., TAVARES, S.M.O., “Rough contacts between actual engineering surfaces: Part I. Simple models for roughness description”, *Wear*, v. 264, pp. 1105-1115, Out. 2007.
- [17] CIULLI, E., FERREIRA, L.A., PUGLIESE, G., TAVARES, S.M.O., “Rough contacts between actual engineering surfaces: Part II: Contact Mechanics”, *Wear*, v. 264, pp. 116-1128, Out. 2007.
- [18] PERSSON, B.N.J., YANG, C., “Theory of the leak-rate of seals”, *Journal of Physics: Condensed Matter* 20, 315011, Jul. 2008.
- [19] OKADA, H., ITOH, T., SUGA, T., “The influence of surface profiles on leakage in room temperature seal-bonding”, *Sensors and Actuators*, v. 144, pp. 124-129, Jan. 2008.
- [20] ARMAND, G., LAPUJOLADE, J., PAIGNE, J., “A Theoretical and Experimental Relationship between the Leakage of Gases Through the Interface of Two Metals in Contact and their Superficial Micro-Geometry”, *Vacuum*, v. 14, pp. 53-57, Dez. 1963.
- [21] ALMQVIST, A., LARSSON, R., PÉREZ-RÀFOLS, F., “Modelling of leakage on

metal-to-metal seals”, *Tribology International*, v. 94, pp. 421-427, Out. 2015.

[22] PUTIGNANO, C., AFFERRANTE, L., CARBONE, G., DEMELIO, G.P., “A multiscale analysis of elastic contacts and percolation threshold for numerically generated and real rough surfaces”, *Tribology International*, v. 64, pp. 148-154, Mar. 2013.

[23] PREGELJ, A., MARJAN, D., MOZETIC, M., “Leak Detection Methods and Defining The Sizes of Leaks”, *The 4th International Conference of Slovenian Society for Nondestructive Testing*, Ljubljana, v. 4, N°2, Fev. 1999.

[24] MARIE, C., LASSEUX, D., “Experimental Leak-Rate Measurement Through a Static Metal Seal”, *Journal of Fluids Engineering, ASME*, v. 129, pp. 799-5, Jun. 2007.

[25] MATSUZAKI, Y., HOSOKAWA, K., FUNABASHI, K., “Mechanism and optimum shape of knife edge for metal sealing”, *Tribology International*, v. 25, pp. 397-403, Japan, 1992.

[26] FOX, R.W., McDonald, A.T., Pritchard, P. J., *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, 6^a ed., LTC, Brasil.

[27] KE, Y., YAO, X., YANG, H., HE, Q., “A measuring method of gas leakage along the contact interface of the stripped rubber seals”, *Measurement*, v.61, pp. 299-304, China, 2014.

[28] ASME B16.5, “Pipe Flanges and Flanged Fittings”, 2017.

[29] ASME B16.20, “Metallic Gaskets for Pipe Flanges”, 2017.

[30] API SPECIFICATION 6A, “Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment”, 20th Ed., Out. 2010.

[31] WU, C.F., HAMADA, M., *Experiments – Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization*, John Wiley & Sons, New York, 2000.

[32] MONTGOMERY, D. C., *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, New York, 2001.

[33] CONOVER, W.J., *Practical Nonparametric Statistics*, Wiley & Sons, New York, 1999.

[34] TODOROVIC, P., TADIC, B., VUKELIC, D., JEREMIC, M., RANDJELOVIC, S., “Analysis of the influence of loading and the plasticity index on variations in surface roughness between two flat surfaces”, *Tribology International*, v. 81, pp. 276-282, Serbia, 2014.

[35] Manual de Aços Gerdau, edição 2003.

[36] BACK, N., BURDEKIN, M., COWLEY, A., “Review of the Research on Fixed and Sliding Joints”. In: *Proc. 13th Int. Machine Tool Design and Research Conference*, MacMillan, London, 1473, pp. 87-97, Sep. 1972.

[37] LEDOUX, Y., LASSEUX, D., FAVRELIERE, H., GRANDJEAN, J., “On the dependence of static flat seal efficiency to surface defects”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 88, pp. 518-529, Jun. 2011.

[38] BIGERELLE, M., DELTOMBE, R., JOURANI, A., “Analysis of the effects of different machining processes on sealing”, *Surface Topography: Metrology and Properties*, v. 4, Dez. 2015.

Apêndice A - Planicidade dos Corpos de Prova (μm)

	90	180	270	Média		90	180	270	Média		90	180	270	Média
A1	2	1	3		B1	2	1	0		C1	2	5	4	
	2	4	2	2.6		2	2	0	1.3		1	4	4	3.3
	5	4	0			1	2	2			2	3	5	
A2	1	5	4		B2	8	14	5		C2	5	8	6	
	1	7	6	4.1		4	8	7	6.2		7	8	4	6.2
	0	7	6			1	5	4			5	7	6	
A3					B3	7	4	5		C3	5	7	9	
						7	4	4	4.2		5	7	10	7.1
						2	5	0			4	7	10	
A4	2	5	9		B4	4	1	3		C4	10	10	7	
	2	5	8	5.6		2	2	1	1.9		9	7	7	7.3
	1	9	9			0	3	1			7	5	4	
A5	7	1	1		B5	7	10	3		C5	7	9	9	
	9	0	2	3.0		8	10	2	5.3		10	8	7	7.9
	7	2	-2			2	5	1			7	7	7	
A6	9	7	8		B6	1	8	10		C6	0	2	7	
	8	5	8	7.4		0	7	9	5.3		0	1	9	3.7
	9	6	7			0	6	7			3	4	7	
A7	10	8	5		B7	1	2	2		C7	10	4	5	
	10	9	4	7.6		1	2	1	1.6		10	5	10	6.6
	9	9	4			2	2	1			9	3	3	
A8	9	7	5		B8	0	5	3		C8	4	7	8	
	8	5	7	6.4		1	6	4	3.4		7	7	10	6.7
	7	5	5			1	5	6			4	7	6	
A9	4	3	5		B9	5	2	5		C9	8	9	10	
	5	3	2	3.3		5	1	5	3.7		8	10	8	9.0
	4	1	3			5	1	4			9	10	9	
A10	0	2	2		B10	9	9	4		C10	2	9	7	
	1	1	2	1.2		9	9	1	6.2		5	7	10	6.4
	0	1	2			6	9	0			2	7	9	
A11	0	3	6		B11	2	2	0		C11	1	2	10	
	2	3	5	3.0		1	0	0	1.1		4	0	10	4.1
	2	3	3			1	2	2			2	6	2	
A12	4	6	11		B12	2	3	3		C12	8	2	3	
	2	7	8	5.9		3	4	3	3.0		10	3	9	5.3
	0	7	8			2	4	3			8	5	0	
A13	5	2	7		B13	5	5	3		C13	7	6	9	
	5	2	8	4.2		6	5	4	4.7		10	7	10	7.8
	4	2	3			6	5	3			6	6	9	
A14	1	5	5		B14	7	5	3		C14	7	8	8	
	1	5	4	3.4		7	3	2	4.7		10	10	5	7.9
	1	5	4			7	5	3			8	7	8	
A15	6	5	10		B15	2	0	0		C15	4	5	5	
	5	3	7	5.7		2	2	2	1.4		9	7	8	6.0
	5	3	7			2	1	2			6	5	5	

Apêndice B – Procedimento de Teste

Execução do Ensaio com Gás:

- 1- Posicionar a superfície de referência;
- 2- Posicionar o corpo de prova
- 3- Posicionar o atuador observando o alinhamento da direção do êmbolo com o rebaixo no corpo de prova;
- 4- Posicionar o espaçador;
- 5- Efetuar o deslocamento do êmbolo até a parte superior do corpo de prova;
- 6- Verificar novamente o alinhamento entre os componentes;
- 7- Ligar o sistema de aquisição de dados;
- 8- Verificar a comunicação entre o DL e o computador;
- 9- Iniciar a gravação dos dados;
- 10- Iniciar aplicação da carga de teste via pressão hidráulica no atuador;
- 11- Monitorar via DL a estabilização da pressão de suprimento hidráulico;
- 12- Repor a pressão se necessário;
- 13- Abrir lentamente a válvula do cilindro para suprimento de gás;
- 14- Observar a leitura de pressão do TP1 e atentar para vazamentos;
- 15- Elevar gradualmente a pressão até o valor estabelecido alvo;
- 16- Após atingir a pressão de teste, fechar a válvula de admissão de gás;
- 17- Fechar a válvula do cilindro;
- 18- Aliviar a pressão da mangueira de suprimento para a atmosfera;
- 19- Iniciar o período de monitoramento de 15 minutos.

Apêndice C – Algoritmos utilizados para extração e manipulação dos dados dos testes

Código para extrair as taxas de queda de pressão a partir dos arquivos em formato texto:

```
setwd("E:/Back
Up/Documentos/MESTRADO/Dissertação/Experimento/Dados/Geral/Final")

library(dplyr)

library(ggplot2)

library(smooth)

library(Mcomp)

# Carrega todos os txts da pasta de trabalho

lista_arquivos <- list.files(pattern = "*.txt")

Z=1 #Referência para buscar os arquivos TXT

fileConn<-file("E:/Back
Up/Documentos/MESTRADO/Dissertação/Experimento/Dados/Geral/Final/Resultado.t
xt")

texto <- ""

while (Z<length(lista_arquivos) + 1){

  dat <- read.delim2(lista_arquivos[Z], stringsAsFactors = F)

  file<- lista_arquivos[Z] #carrega o nome do arquivo em uso

  dat <- select(dat, Pmacaco, Pcorpo, Tcorpo) #coleta as colunas de interesse do TXT

  dat <- as.data.frame(sapply(dat, as.numeric))

  # Procedimento para calcular a taxa de queda de pressão

  t0 <- which.max(dat$Pcorpo) #tempo no qual a Pcorpo atinge valor máximo

  dat <- dat[t0:nrow(dat),] # Descartar rampa de subida
```

```

t0 <- which.min(abs(dat$Pcorpo-2000)) #Tempo no qual o valor de Pcorpo é o mais
próximo de 2000

#t0 <- t0 + 14999 #Adicionar valor que avança a janela à frente de 2000 psi

dat <- dat[t0:min(nrow(dat), t0 + 15000),] #Dat agora começa pelo valor mais próximo
de 2000 psi e vai até o valor somado

dat3<- dat[t0:(t0 + 4500),]

dat3s<- dat[t0:(t0 + 75),]

dat <- data.frame(tempo = seq(0, (nrow(dat) - 1) / 25, 0.04), dat) #cria coluna do
tempo em segundos

dat3<- data.frame(tempo = seq(0, (nrow(dat3) - 1) / 25, 0.04), dat3)

dat3s<- data.frame(tempo = seq(0, (nrow(dat3s) - 1) / 25, 0.04), dat3s)

max(dat$Pcorpo) # valor máximo da Pcorpo

#plot(dat$Pcorpo, col = "dark red", main= file, ylab = "psi", xlab = " pontos")

#####SUAVIZAÇÃO DA CURVA DE PRESSÃO NO CORPO #####

medmov<-sma((dat$Pcorpo/145), order=10, h=10, silent=T)

Pset<-medmov$fitted

medmov3<-sma((dat3$Pcorpo/145), order=10, h=10, silent=T)

Pset3<-medmov3$fitted

medmov3s<-sma((dat3s$Pcorpo/145), order=2, h=10, silent=T)

Pset3s<-medmov3s$fitted

# Taxa Básica de Queda de pressão 10 minutos

Dp<-round((Pset[nrow(Pset)]-Pset[1]), 2)

t <- dat$tempo[nrow(dat)]

Deltat <- nrow(dat)/ 1500

Deltat <-round(Deltat, 2) #minutos

Taxa <- Dp/Deltat

```

```

Taxa <- round(Taxa, 3)

# Taxa Instantânea de Queda

#Dpi<-diff(Pset)

#Dti<-diff(dat$tempo)

#Derivada<-(Dpi/Dti)*-1

#Derivada<-as.numeric(round(Derivada, 1))

#DevMed<-round(mean(Derivada), 2)

# Taxa Básica de Queda de pressão 3 segundos

Dp3s<-round((Pset3s[nrow(Pset3s)]-Pset3s[1]), 2)

t <- dat3s$tempo[nrow(dat3s)]

Deltat3s <- nrow(dat3s)/ 1500

Deltat3s <-round(Deltat3s, 2) #minutos

Taxa3s <- Dp3s/Deltat3s

Taxa3s <- round(Taxa3s, 3)

# Força Líquida Média

Fmacaco<-(dat3s$Pmacaco/145)*1134.115

Fcorpo<-(dat3s$Pcorpo/145)*962.12

Fliq<-Fmacaco-Fcorpo

FliqM<-round(mean(Fliq), 2)

# Taxa Instantânea de Queda

Dpi3s<-diff(Pset3s)

Dti3s<-diff(dat3s$tempo)

Derivada3s<-(Dpi3s/Dti3s)*-1

Derivada3s<-as.numeric(round(Derivada3s, 4))

DevMed3s<-round(mean(Derivada3s), 4)

```

```

nome <- lista_arquivos[Z]

pasta<-file.path("E:", "Back Up", "Documentos", "MESTRADO", "Dissertação", "Fotos
e Figuras", "81", "Taxa", paste(nome, ".png", sep = ""))

png(file=pasta, width = 894, height = 533, units = "px", pointsize = 12, bg = "white",
res = 120, family = "", restoreConsole = TRUE, type = c("windows", "cairo", "cairo-
png"))

plot(Pset, main = paste('Arquivo', nome, 'Taxa', Taxa, '[MPa/min]', sep = "  "),
xlab="min/1500 (total de 10 minutos)", ylab="Pressão no Corpo [MPa]", type = "l",
lwd = 2)

dev.off()

#pasta3<-file.path("E:", "Back Up", "Documentos", "MESTRADO", "Dissertação",
"Fotos e Figuras", "81", "Taxa3", paste(nome, ".png", sep = ""))

#png(file=pasta3, width = 894, height = 533, units = "px", pointsize = 12, bg =
"white", res = 120, family = "", restoreConsole = TRUE, type = c("windows",
"cairo", "cairo-png"))

#plot(Pset3, main = paste('Arquivo', nome, 'Taxa5', Taxa, '[MPa/min]', sep = "  "),
xlab="seg/25", ylab="Pressão no Corpo [MPa]", type = "l", lwd = 2)

#dev.off()

#pasta3s<-file.path("E:", "Back Up", "Documentos", "MESTRADO", "Dissertação",
"Fotos e Figuras", "81", "Taxa3s", paste(nome, ".png", sep = ""))

#png(file=pasta3s, width = 894, height = 533, units = "px", pointsize = 12, bg =
"white", res = 120, family = "", restoreConsole = TRUE, type = c("windows",
"cairo", "cairo-png"))

#plot(Pset3s, main = paste(nome, 'Taxa c Média Móvel', sep = ' '), xlab="seg/25",
ylab="Pressão no Corpo [MPa]", type = "l", lwd = 2)

#dev.off()

texto <- paste(texto, nome, Dp3s, DevMed3s, Taxa3s, FliqM, "\n")

Z <- Z+1

}

writeLines(texto, fileConn)

close(fileConn)

```

Código utilizado para calcular as médias das medições perfilométrica com leitura de arquivos em PDF:

```
#install.packages("devtools")

#devtools::install_github("augustofadel/rug")

library(rug)

# local onde estao as pastas com os pdf de cada corpo de prova:

local_arquivos <- "E:/Back
Up/Documentos/MESTRADO/Dissertação/Experimento/Medições/Depois"

# carrega lista de corpos de prova (pastas encontradas em 'local_arquivos')

lista_cps <- list.dirs(local_arquivos, recursive = F)

# calcula medias para cada corpo de prova

rugo <- NULL

for (cp in lista_cps) {

  rugo <- rbind(

    rugo,

    ler_perfil(

      cp,

      var = c('Ra', 'Rq', 'Rda', 'Rsk', 'Rku', 'Rz', 'Rt', 'Rdq', 'RSm', 'Rmr'),

      und = c('µm', 'µm', '°', '"', '"', 'µm', 'µm', '°', 'µm', '%')

    )

  )

}

# tabela final

rugo

# salva csv
```



```
write.csv(rugo, "E:/Back  
Up/Documentos/MESTRADO/Dissertação/Experimento/Medições/Depois/rugosidades.  
csv")
```

Código utilizado para efetuar as análises dos dados após coleta de taxas e de parâmetros de superfície:

```
setwd("E:/Back  
Up/Documentos/MESTRADO/Dissertação/Experimento/Dados/Geral/Final")  
  
library(rsm)  
  
library(agricolae)  
  
dados <- read.csv2("ResultadoFinal2.csv", header=T, stringsAsFactors = FALSE)  
  
#Leitura das colunas  
  
Força<-as.numeric(dados[,4])  
  
Dureza<-as.numeric(dados[,3])  
  
Rugosidade<-(dados[,2])  
  
#TaxaPressao<-as.numeric(dados[,22])  
  
#TaxaPressao3<-as.numeric(dados[,23])  
  
TaxaPressao3s<-as.numeric(dados[,16])  
  
Ra<-as.numeric(dados[,5])  
  
Rq<-as.numeric(dados[,6])  
  
Rda<-as.numeric(dados[,7])  
  
Rsk<-as.numeric(dados[,8])  
  
Rku<-as.numeric(dados[,9])  
  
Rv<-as.numeric(dados[,10])  
  
Rt<-as.numeric(dados[,11])  
  
Rdq<-as.numeric(dados[,12])
```

```

RSm<-as.numeric(dados[,13])

RPc<-as.numeric(dados[,14])

Rmr<-as.numeric(dados[,15])

#Der<-as.numeric(dados[,16])

#FliqM<-as.numeric(dados[,18])

#Avaliação Gráfica

plot(Ra, TaxaPressao3s, main = "Dispersão dos dados", xlab="Ra [mícrons]",
ylab="Queda de Pressão [MPa/min]", pch=16)

plot(Rq, TaxaPressao3s, main = "Dispersão dos dados", xlab="Rq [mícrons]",
ylab="Queda de Pressão [MPa/min]", pch=16)

plot(Rv, TaxaPressao3s, main = "Dispersão dos dados", xlab="Rv [mícrons]",
ylab="Queda de Pressão [MPa/min]", pch=16)

plot(Rda, TaxaPressao3s, main = "Dispersão dos dados", xlab="Rda [graus]",
ylab="Queda de Pressão [MPa/min]", pch=16)

plot(RSm, TaxaPressao3s, main = "Dispersão dos dados", xlab="RSm [mícrons]",
ylab="Queda de Pressão [MPa/min]", pch=16)

plot(Rt, TaxaPressao3s, main = "Dispersão dos dados", xlab="Rt[mícrons]",
ylab="Queda de Pressão [MPa/min]", pch=16)

plot(Rdq, TaxaPressao3s, main = "Dispersão dos dados", xlab="Rdq [mícrons]",
ylab="Queda de Pressão [MPa/min]", pch=16)

plot(Rsk, TaxaPressao3s, main = "Dispersão dos dados", xlab="Assimetria",
ylab="Queda de Pressão [MPa/min]", pch=16)

plot(Rku, TaxaPressao3s, main = "Dispersão dos dados", xlab="Curtose", ylab="Queda
de Pressão [MPa/min]", pch=16)

plot(RPc, TaxaPressao3s, main = "Dispersão dos dados", xlab="picos/cm",
ylab="Queda de Pressão [MPa/min]", pch=16)

plot(Rmr, TaxaPressao3s, main = "Dispersão dos dados", xlab="% de material",
ylab="Queda de Pressão [MPa/min]", pch=16)

plot(FliqM, TaxaPressao3s, main = "Dispersão dos dados", xlab="Força Líquida [N]",
ylab="Queda de Pressão [MPa/min]", type = 'l')

```

```
#Boxplot Taxa Pressão
```

```
boxplot(TaxaPressao3s~Dureza, main = "Diagrama de Caixa", ylab = "Queda de  
pressão [MPa/min]", xlab = "Dureza [HRC]" )
```

```
boxplot(TaxaPressao3s~Rugosidade, main = "Diagrama de Caixa", ylab = "Queda de  
pressão [MPa/min]", xlab = "Rugosidade [Grupos]" )
```

```
boxplot(TaxaPressao3s~Força, main = "Diagrama de Caixa", ylab = "Queda de pressão  
[MPa/min]", xlab = "Força Inicial [Grupos]" )
```

```
##### AGRICOLAE #####
```

```
Median.test(TaxaPressao3s, Dureza, alpha = 0.05)
```

```
Median.test(TaxaPressao3s, Rugosidade, alpha = 0.05)
```

```
Median.test(TaxaPressao3s, Força, alpha = 0.05)
```

```
##### ANOVA #####
```

```
#Análise de Variância Sem Interação - TaxaPressão
```

```
anova1<-aov(TaxaPressao3s~Rugosidade+Dureza+Força)
```

```
anova1
```

```
summary(anova1)
```

```
#Análise de Variância Com Interação - TaxaPressão
```

```
anova2<-aov(TaxaPressao3s~Rugosidade*Dureza*Força)
```

```
anova2
```

```
summary(anova2)
```

```
##### AJUSTE MODELO LINEAR #####
```

```
#2Ajuste Modelo Linear
```

```
Ajuste2<-lm(TaxaPressao~Ra*RSm+RPc-1)
```

```
Ajuste2
```

```
summary(Ajuste2)

plot(Ajuste2)

#3Ajuste Modelo Linear

Ajuste3<-lm(TaxaPressao~(Ra+Rv))

Ajuste3

summary(Ajuste3)

plot(Ajuste3)

#4Ajuste Modelo Linear

Ajuste4<-lm(TaxaPressao~(Ra*Rv))
```

Apêndice D – Resultados das Medições Perfilométricas

Resultados das Medições para os 81 ensaios do primeiro grupo.

CP	Ra (µm)	Rq (µm)	Rda (°)	Rsk	Rku	Rv (µm)	Rt (µm)	Rdq (°)	RSm (µm)	RPc (pc/cm)	Rmr (%)
A10	0.16	0.21	6.24	-1.08	6.24	1.02	2	7.81	89	1087	61.5
A10	0.692	0.922	7.81	-1.04	5.35	2.37	4.27	9.39	90	696.5	55.7
A10	0.75	0.99	8.07	-1.05	5.09	3.72	6.54	10.97	91	306	56.14
A11	0.2	0.29	5.56	-1.58	8.85	1.3	2.92	7.08	230	804	57.2
A11	0.47	0.64	6.17	-1.3	6.77	2.71	5	8.73	99	373	56.56
A11	0.5	0.72	6.49	-2.01	11.05	2.95	6.39	8.96	126	377	59.3
A11	0.56	0.77	7.35	-1.35	7.78	2.92	7.04	10.22	130	388	57.73
A12	0.16	0.21	5.05	-1.16	6.26	0.98	1.86	6.45	86	933	62
A12	0.45	0.7	4.99	-2.73	14.37	3.55	6.12	7.59	206	297	64.4
A12	0.461	0.693	4.97	-2.62	16	2.265	3.92	7.46	145	639	62.1
A13	0.17	0.22	5.83	-1.06	5.14	0.98	1.72	7.33	84	981	59.46
A15	0.19	0.26	3.57	-1.29	7.01	1.23	2.35	5.02	98	551	56.82
A2	0.266	0.406	3.66	-1.98	14.9	2.055	3.9	6.085	141.5	424.5	56.8
A2	0.45	0.65	4.83	-2	10.75	2.88	5.45	7.15	185	298	60.71
A5	0.73	0.98	7.89	-0.96	5.97	3.47	8.13	10.87	143	308	55.34
A5	0.81	1.13	11.18	-1.86	13.43	4.82	11.93	14.92	129	419	54.74
A6	0.6	0.81	6.1	-0.99	5.69	2.83	6.45	8.4	191	288	52.775
A8	0.74	0.99	7.64	-1.06	5.67	3.78	7.63	10.59	145	299	55.74
A9	0.77	1.03	6.87	-0.582	5.43	3.63	7.885	10.495	159	273.5	54.4
A9	0.84	1.1	7.49	-0.7	4.65	3.48	8.14	10.4	173	248	54.365
B1	0.3	0.4	5.36	-0.91	5.32	1.64	3.32	7.48	110	480	54.33
B10	0.16	0.24	2.89	-2.18	10.6	1.2	2.18	4.25	159	514	62.26
B2	0.3	0.4	4.99	-0.93	5.18	1.55	3.3	6.68	126	495	60.03
B2	0.32	0.45	4.48	-1.87	10.7	1.7	3.75	6.31	122	419	57.8
B3	0.17	0.23	3.18	-1.02	5.33	1	1.97	4.52	100	492	55.81
B3	0.31	0.43	4.24	-1.76	10.71	2.09	4.14	6.45	189	387	57.4
B3	0.44	0.62	7.28	-1.22	7.82	2.54	5.94	9.96	130	467	56.61
B4	0.32	0.41	5.67	-0.91	4.89	1.7	3.44	7.76	90	494	55.82
B4	0.34	0.45	6.24	-0.84	4.89	1.77	3.82	8.53	84	522	55.83
B5	0.34	0.46	6.16	-1.29	6.16	1.86	4.18	8.73	111	519	54.835
B5	0.63	0.84	7.73	-0.74	4.88	2.81	6.88	10.82	129	343	53.84
B7	0.15	0.22	4.61	-1.77	9.17	1.1	2.08	6.13	117	906	57.3
B8	0.15	0.23	3.3	-2.07	9.78	1.17	2.02	4.73	107	601	60.76
B9	0.77	1.04	7.92	-0.96	4.68	3.46	7.19	10.96	110	314	58.31
C1	0.82	1.04	7.92	-0.19	3.15	2.88	6.6	10.8	209	232	51.98
C12	0.14	0.2	2.89	-1.9	10.51	0.97	1.96	4.08	124	614	58.56
C12	0.17	0.23	3.33	-1.76	10.15	1.08	2.15	4.59	121	614	56.91
C12	0.18	0.24	3.47	-0.9	9.8	0.99	2.87	4.88	187	586	57.09
C13	0.45	0.61	4.36	-1.42	7.02	2.23	4.73	6.31	168	265	57.27
C13	0.46	0.6	4.82	-0.97	4.79	2.17	4.09	6.94	138	269	54.74
C14	0.22	0.31	4.04	-1.66	8.51	1.46	3.01	5.74	160	578	57.8
C14	0.22	0.3	3.54	-1.23	5.67	1.19	2.29	5.01	113	497	58.2
C15	0.567	0.724	5.59	-0.385	3.63	1.64	3.335	6.565	117.5	384.5	51.9
C15	0.6	0.76	5.83	-0.3	3.04	2.09	4.38	8.12	122	272	51.71
C2	0.46	0.61	4.63	-1.19	5.78	2.22	4.61	6.6	195	283	56.99
C5	0.47	0.62	5.97	-0.97	4.7	2.24	4.13	8.27	99	387	56.51
C5	0.52	0.68	6.32	-0.81	5.12	2.31	5.87	8.9	115	319	57.29
C6	0.52	0.74	5.16	-1.78	11.48	2.47	6.02	7.3	222	269	57.84
C7	0.22	0.32	3.68	-1.89	11.92	1.52	3.31	5.31	187	504	56.96
C8	0.71	0.91	7	-0.08	3.85	2.56	6.31	9.46	137	286	56.96

Resultados das Medições para os 27 ensaios do segundo grupo.

CP	Ra (µm)	Rq (µm)	Rda (°)	Rsk	Rku	Rv (µm)	Rt (µm)	Rdq (°)	RSm (µm)	RPc (pc/cm)
A11	0.15	0.22	2.5	-2.11	12.04	1.21	2.26	3.76	172.39	450
A12	0.43	0.58	6.46	-1.1	7.17	2.09	5	8.92	136.64	404
A13	0.2	0.26	3.43	-0.92	4.74	1.07	2.05	4.86	96.52	435
A2	0.2	0.31	3.76	-2.77	24.94	1.44	3.56	5.35	228.96	496
A5	0.7	0.92	6.6	-0.68	4.79	3.02	6.95	9.43	138.68	250
A6	0.43	0.57	5.57	-0.67	4.17	1.97	4.3	7.88	106.33	401
A7	0.63	0.81	6.81	-0.47	3.72	2.52	5.38	9.47	120.22	295
A8	0.57	0.74	7.58	-0.68	4.29	2.45	5.64	10.48	102.6	384
A9	0.7	0.89	7.25	-0.47	3.65	3.06	6.44	10.19	109.76	293
B10	0.18	0.25	3.68	-1.95	11.78	1.32	2.49	5.16	122.48	574
B11	0.51	0.69	6.35	-1.11	6	2.58	5.67	9.23	130.35	332
B12	0.62	0.82	6.91	-0.72	5.24	2.95	6.29	9.85	125.35	322
B15	0.61	0.79	6.52	-0.52	4.13	2.75	6.2	9.29	126.24	291
B2	0.22	0.32	3.19	-1.98	12.14	1.54	3.06	4.78	202.85	400
B4	0.34	0.47	4.54	-1.45	9.22	2.06	4.54	6.77	141.35	370
B5	0.63	0.81	7.62	0.06	3.61	2.26	6.09	10.49	110.37	316
B7	0.33	0.46	5.5	-1.33	8.44	1.76	4.47	7.96	132.43	473
B8	0.15	0.21	2.81	-1.51	8.67	1.04	1.85	4.07	123.93	519
C1	0.83	1.02	7.11	-0.38	2.93	2.91	6.09	9.98	140.2	221
C12	0.13	0.18	2.92	-1.65	14.2	0.91	2.13	4.13	277.57	629
C14	0.53	0.69	6.34	-0.42	4.03	2.42	5.54	8.82	111.04	346
C15	0.43	0.56	5.84	-0.43	4.51	1.97	4.75	8.33	124.05	381
C3	0.82	1.04	7.56	-0.5	3.39	2.94	6.78	10.49	125.25	258
C5	0.15	0.23	2.99	-1.87	11.45	1.14	2.27	4.15	210.68	578
C6	0.37	0.52	5.9	-1.25	7.23	2.04	4.67	8.17	144.03	442
C7	0.21	0.28	3.52	-1.42	7.72	1.25	2.44	4.86	118.16	500
C8	0.63	0.82	7.47	-0.53	4.15	2.67	6.08	10.38	121.06	326

Apêndice E – Desenhos da gaiola e dos corpos de prova

1

2

3

4

A

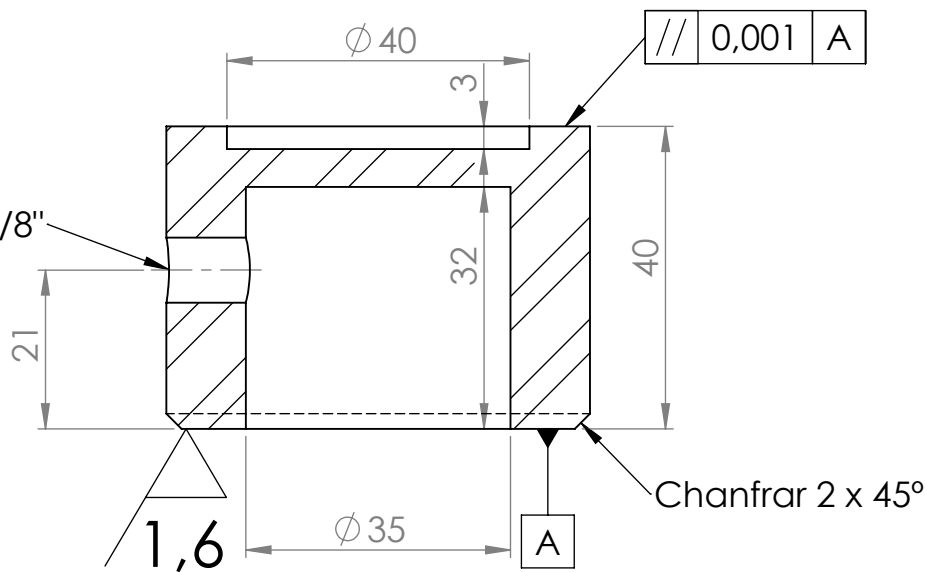
B

C

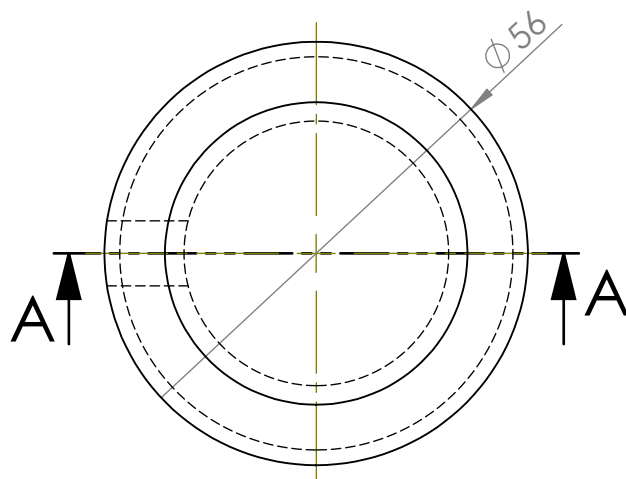
D

E

Rosca NPT 1/8"



SEÇÃO A-A



Notas:
1 - Fazer 5 corpos de cada material (1045, 4130 e 4340)
2 - Arredondar todos os cantos vivos
3 - Observar o paralelismo (atingir o melhor possível)

SE NÃO ESPECIFICADO:
DIMENSÕES EM MILÍMETROS
ACABAM. DE SUPERFÍCIE:
TOLERÂNCIAS:
LINEAR:
ANGULAR:

ACABAMENTO:
Rugosidade máxima
apenas na superfície
indicada

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

0

	NOME	ASSINATURA	DATA
DES	CAFP		01/09
VERIF.	CP		17/09
APROV.	PADOA		01/10

TÍTULO:

Cabeçote Vedação v2

MANUF

QUALID

MATERIAL:

Ver Notas

DES. N 

002-A

A4

PESO: ~0,2 kg

ESCALA:1:1

FOLHA 1 DE 1



- D

E

ACABAMENTO:

REBARBAR E
QUEBRAR
ARESTAS
AGUDAS

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

F

TÍTULO:

DES. N°

Gaiola

A4

PESO:	
-------	--

ESCALA:1:5

FOLHA 1 DE 1